



Universidad  
Carlos III de Madrid

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

2015-2016

*Trabajo Fin de Grado*

“DISEÑO Y ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE LA  
INTEGRACIÓN DE UN SISTEMA DE  
DESALINIZACIÓN MULTIEFECTO EN UNA  
PLANTA DE CONCENTRACIÓN SOLAR EN  
ESPAÑA”

---

Rubén Blanco Peña

Tutor

Javier Villa Briongos

Leganés, 3 de Octubre de 2016

**Título:** Diseño y análisis tecno-económico de la integración de un sistema de desalinización multiefecto en una planta de concentración solar en España

**Autor:** Rubén Blanco Peña

**Tutor:** Javier Villa Briongos

#### EL TRIBUNAL

Presidente: Pedro Acisclo Rodríguez Aumente

Vocal: Antonio Díaz Álvarez

Secretaria: Amaya García Casas

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 3 de Octubre de 2016 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de:

PRESIDENTE

VOCAL

SECRETARIA

# AGRADECIMIENTOS

---

*“Aquel niño que quería ser ingeniero al fin cumple su sueño.*

*4 años de esfuerzo, de dedicación, de responsabilidad y de trabajo duro. 4 años de alegrías, ilusiones, aprendizaje y grandes amigos, pero también de dificultades, exámenes imposibles, y algún que otro susto con alguna nota. 4 años que concluyen aquí, en este trabajo de fin de grado, al que he dedicado muchísimas horas y en las que ni la frustración ni los problemas han impedido que quede terminado.*

*Quiero agradecer a mis padres y hermano todo el apoyo mostrado, tanto en los buenos momentos como en los malos de bajón y cansancio. Gracias a ellos, he llegado hasta donde estoy.*

*También le dedico este trabajo a mis abuelos, que estaban orgullosos de mí y a los que estoy seguro les hubiera encantado verme terminar la carrera.*

*Gracias a todos los buenos profesores que he tenido durante la carrera, en especial a mi tutor del trabajo de fin de grado Javier, por el interés mostrado durante el transcurso del proyecto.*

*Y finalmente, gracias a todos los amigos y amigas que siempre apostaron por mí y que me dieron la confianza que necesitaba en muchos momentos.*

*Muchas gracias a todos.”*

# RESUMEN/ABSTRACT

---

En este Trabajo Fin de Grado se realiza un diseño y análisis técnico-económico de un sistema de cogeneración (CSP+D) que incluye una planta termosolar de concentración de colectores cilindro parabólicos, y una planta desalinizadora de múltiple efecto.

Previamente, se realiza un análisis de todos los componentes disponibles en el mercado susceptibles de integrarse en dicho sistema de cogeneración, además de la posterior selección de los más apropiados

Una vez identificados, estudiados y seleccionados los componentes, se realiza en el proyecto el estudio de localización de la planta y posteriormente, el diseño y comportamiento termodinámico de esta. Finalmente, una simulación de viabilidad económica, con estudios de costo de capital, permite definir la rentabilidad de instalar en España el sistema CSP+D.

In this final degree project it's performed a design and techno-economic analysis of a cogeneration system (CSP+D), that includes a solar thermal power plant of parabolic through technology, and a multi-effect desalination plant.

Previously, it's performed an analysis of all components available in market capable of their integration in the cogeneration system. Further this, it's carried out the selection of the most appropriated.

Once components are identified, studied and selected, it's executed in project the study of the localization of plant and later, the design and thermo-dynamic behavior of this. Finally, an economic viability simulation, with capital costs, allows defining the profitability to install the system CSP+D.

# ÍNDICE

<b>OBJETIVOS Y ALCANCE.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. SITUACIÓN ACTUAL DE AGUA Y ENERGÍA .....</b>	<b>2</b>
1.1 INTRODUCCIÓN .....	2
1.2 SITUACIÓN DEL AGUA .....	2
1.2.1 PROBLEMÁTICA DEL AGUA .....	2
1.2.2 RECURSOS DE AGUA EN ESPAÑA.....	4
1.2.3 ENERGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA: DESALINIZACIÓN .....	5
1.3 SITUACIÓN DE LA ENERGÍA.....	6
1.3.1 PROBLEMÁTICA ENERGÉTICA Y ALTERNATIVAS SOSTENIBLES .....	6
1.3.2 SITUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA CSP EN ESPAÑA.....	8
1.3.3 AGUA PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA .....	9
➤ Uso del agua en centrales termosolares de concentración (CSP).....	9
1.4 CONCLUSIÓN: CSP+D.....	10
<b>CAPÍTULO 2. TECNOLOGÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR CSP .....</b>	<b>12</b>
2.1 INTRODUCCIÓN .....	12
2.2 COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS CSP.....	13
2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS CSP.....	13
2.3.1 SISTEMAS DE COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO .....	15
2.3.2 SISTEMAS DE CONCENTRADORES LINEALES FRESNEL.....	16
2.3.3 SISTEMAS DE RECEPTOR CENTRAL .....	18
2.3.4 SISTEMAS DE DISCO PARABÓLICO .....	19
2.4 COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS CSP .....	21
2.5 SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA MÁS ADECUADA PARA CSP+D .....	22
<b>CAPÍTULO 3. PLANTA TERMOSOLAR DE COLECTORES CILINDRO PARABÓLICOS .....</b>	<b>23</b>
3.1 INTRODUCCIÓN .....	23
3.2 CONFIGURACIÓN Y ELEMENTOS DE LA PLANTA TERMOSOLAR .....	23
3.2.1 CAMPO DE CAPTADORES O COLECTORES .....	24
➤ COMPONENTES DEL COLECTOR .....	25
➤ IMPLANTACIÓN Y DISEÑO DEL CAMPO DE COLECTORES.....	28
3.2.2 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO.....	33
3.2.3 GENERADOR DE VAPOR .....	35
3.2.4 CALDERA AUXILIAR DE COMBUSTIÓN FÓSIL .....	35
3.2.5 TANQUE DE EXPANSIÓN .....	36
3.2.6 SISTEMA DE CONVERSIÓN DE POTENCIA .....	37
➤ MODELIZADO DEL CICLO .....	40
➤ ECUACIONES CORRESPONDIENTES AL CICLO .....	42
3.3 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN UTILIZADOS EN PLANTAS CSP .....	46
➤ COMPARATIVA Y SELECCIÓN DEL MÉTODO DE REFRIGERACIÓN MAS ADECUADO PARA UNA PLANTA CSP+D .....	48

<b>CAPÍTULO 4. DESALINIZACIÓN POR EVAPORACIÓN DE MÚLTIPLE EFECTO .....</b>	<b>50</b>
4.1 INTRODUCCIÓN .....	50
4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE DESALINIZACIÓN .....	50
4.2.1 OSMOSIS INVERSA .....	52
4.2.2 DESTILACIÓN SÚBITA POR EFECTO FLASH MULTITAPA (MSF).....	53
4.2.3 DESTILACIÓN MULTIEFECTO (MED).....	54
4.3 SELECCIÓN DEL PROCESO DE DESALINIZACIÓN MÁS ADECUADO .....	55
4.4 PROCESO DE DESTILACIÓN POR MÚLTIPLE EFECTO (MED).....	56
4.4.1 ANATOMÍA Y FUNCIONAMIENTO .....	56
4.4.2 LIMITACIONES DE LAS PLANTAS MED (SISTEMAS LT-MED).....	58
4.4.3 CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS MED .....	59
1. Clasificación según disposición de tubos en evaporador .....	59
2. Clasificación según dirección del flujo del agua .....	60
3. Clasificación según la disposición de los efectos .....	62
4.4.4 MODELIZACIÓN DEL SISTEMA MED SELECCIONADO .....	63
4.5 ESTUDIO ECONÓMICO DE PROCESOS DE DESALINIZACIÓN.....	74
4.5.1 FACTORES QUE AFECTAN AL COSTE DE PRODUCCIÓN.....	74
4.5.2 COSTES DE PRODUCCIÓN: DIRECTOS, INDIRECTOS Y DE OPERACIÓN .....	74
<b>CAPÍTULO 5. CASO ESTUDIO: ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE UN SISTEMA CSP+D .....</b>	<b>79</b>
5.1 INTRODUCCIÓN .....	79
5.2 DIAGRAMA DE LA PLANTA CSP+D .....	79
5.2.1 CONSIDERACIONES DEL SISTEMA DE TRABAJO .....	80
5.3 ASIGNACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DEL SITIO .....	81
5.4 DISEÑO Y ANÁLISIS TÉCNICO.....	82
5.4.1 CAMPO SOLAR .....	82
5.4.2 DISEÑO Y ANÁLISIS DEL CICLO DE POTENCIA .....	84
○ SIMULACIÓN Y RESULTADOS.....	87
5.4.3 DISEÑO Y ANÁLISIS DE LA PLANTA DESALINIZADORA DE MÚLTIPLE EFECTO MED.....	88
○ RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN .....	90
5.5 ANÁLISIS ECONÓMICO .....	91
5.5.1 CÁLCULO DE COSTES DE LA PLANTA MED .....	91
5.5.2 ANÁLISIS DE RENTABILIDAD DE LA PLANTA MED .....	93
❖ CÁLCULO DE LA TASA DE DESCUENTO $r$ o WACC .....	93
❖ COMPARACIÓN DE ESCENARIOS (VAN) .....	96
<b>CONCLUSIONES Y NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>97</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO I .....</b>	<b>102</b>
<b>ANEXO II.....</b>	<b>108</b>
<b>ANEXO III .....</b>	<b>111</b>

## OBJETIVOS Y ALCANCE

---

Existen dos grandes problemas que afectan al adecuado desarrollo de la sociedad actual y que harán mella en el planeta si no se toman soluciones. Uno de ellos es la escasez de agua, un gran bien necesario tanto para la vida humana como para el progreso tecnológico del planeta. El otro, no menos importante, responde a los elevados índices de contaminación que existen, provocados por el excesivo consumo de los combustibles fósiles.

Los objetivos de este *Trabajo fin de Grado* son el planteamiento, diseño, simulación y análisis tecno-económico de una solución capaz de hacer frente a dichas dificultades. Se trata de una central de energía renovable, capaz de producir agua dulce mediante su acoplo con una planta desalinizadora. El proyecto está estudiado para su posible implantación en España.

Se persigue iniciar una toma de contacto de este novedoso sistema combinado a futuras investigaciones. Para ello se presenta una primera y sencilla simulación, mediante softwares informáticos, del funcionamiento interno de la central termosolar combinada. Junto a esto y mediante las adecuadas herramientas, se da una visión económica de los costes y rentabilidad del proyecto presentado. Todo ello enfocado con un toque de motivación para poder ver como en un futuro, la ingeniería ha sido capaz de resolver dos de los mayores conflictos que atacan nuestro planeta.

# CAPÍTULO 1

## SITUACIÓN ACTUAL DE AGUA Y ENERGÍA

---

### **1.1 INTRODUCCIÓN**

El agua y la energía son valiosos recursos que aseguran la prosperidad del ser humano y están sin dudarlo, interrelacionados. El agua es fundamental en la producción de energía: en la generación de electricidad, en la extracción, transporte y procesado de combustibles fósiles, y cada vez más, en el crecimiento de cultivos utilizados para la generación de biocombustibles. De forma similar, la energía es vital tanto para la provisión de agua, como para su aplicación en sistemas para recogida, transporte, distribución y tratamiento de la misma.

Ambos recursos se enfrentan hoy día a crecientes demandas y alta escasez en muchas regiones como consecuencia del crecimiento económico y social o del tan conocido cambio climático.

En este capítulo se analiza la situación actual en cuanto a necesidades del agua y la energía en el contexto mundial y en España, y explica de una manera sencilla la interrelación que existe entre estos dos recursos. Por último, se expone y analiza razonadamente la solución al problema expuesto, base de este trabajo.

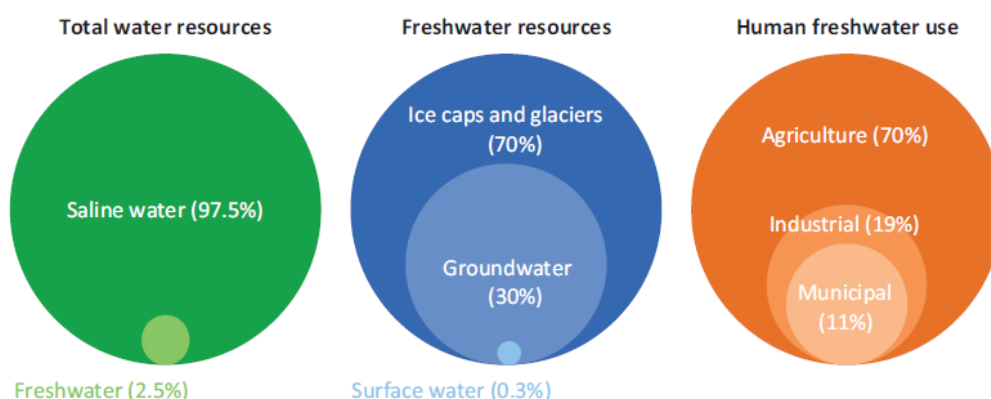
### **1.2 SITUACIÓN DEL AGUA**

#### **1.2.1 PROBLEMÁTICA DEL AGUA**

El agua es un recurso abundante, pero no siempre se encuentra disponible para el uso humano. Los numerosos problemas de calidad, cantidad, tiempo o espacio requeridos por ella están presentes hoy día. De los 1,4 billones de metros cúbicos de las reservas de agua en el planeta, solamente el 2,5% es agua dulce. De ese pequeño porcentaje, menos del 1% está disponible en fuentes de agua presentes en la superficie y acuíferos. El resto se encuentra bloqueado en glaciares y capas de hielo, o enterrado en las profundidades, lo que lo hace inaccesible para el consumo humano. [10]

Dentro de este consumo, la agricultura es el sector que más agua dulce demanda con un 70%, seguido por la industria (incluyendo minería y generación de electricidad) con un 19% del uso del agua. Por último, el uso municipal, tanto público como privado, constituye el 11% de la demanda (véase Figura 1.1).

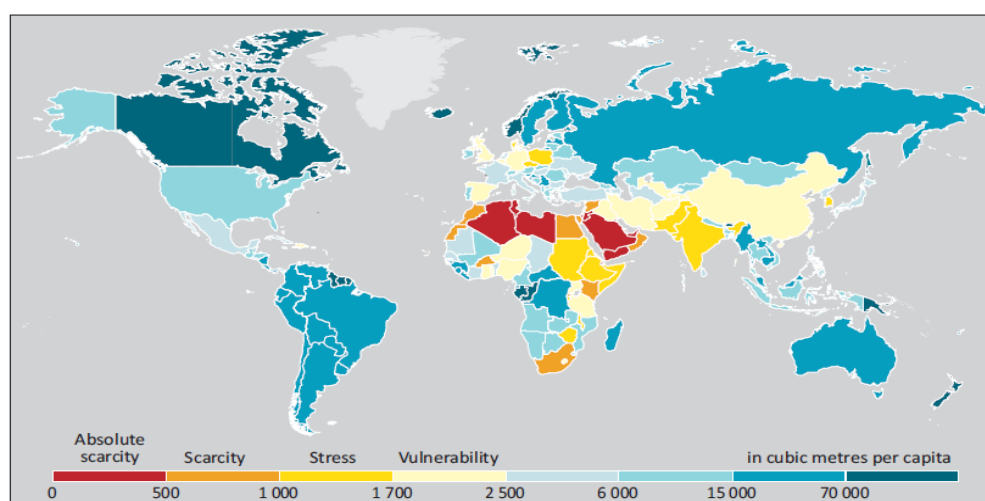




**Figura 1.1.** Recursos de agua mundiales, disponibilidad de agua dulce y consumo humano de agua. Fuente: [10]

El agua dulce es un recurso renovable repuesto por el ciclo del agua. A pesar de esto, está distribuida de manera desigual en el planeta. Actualmente, en torno al 25% de la población mundial no tiene acceso a agua dulce, y más de 80 países hacen frente a serios problemas de escasez que repercuten de manera grave en los desarrollos económicos. [23]

Existen en el planeta zonas de alta abundancia acuática como la selva amazónica, así como zonas de gran escasez como los países pertenecientes al norte y centro-este de África, quienes no presencian lluvias en todo el año debido a las altas temperaturas que atacan la zona (véase Figura 1.2).



**Figura 1.2.** Recursos de agua renovable *per cápita*, 2010. Fuente: [10]

Como se puede observar, muchas regiones del planeta se encuentran actualmente con problemas de escasez de agua, y los pronósticos dictan que este problema alcanzará un nivel crítico para mediados de este siglo. Para el año 2030, el 47 % de la población

mundial vivirá en zonas de alta escasez de agua, y más de 5 billones de personas (67% de la población mundial) no tendrán acceso a un adecuado saneamiento. [23]

El constante aumento de las temperaturas debidas al cambio climático generará enormes olas de calor que evaporarán los escasos recursos de agua dulce presentes en el planeta y aumentarán el nivel de agua del mar (fundición de los glaciares) generándose así inundaciones y contaminación de los ya escasos suministros de agua dulce.

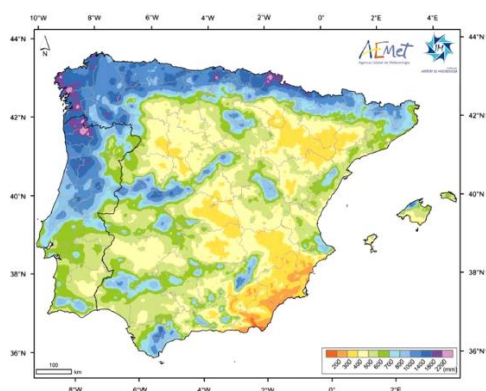
Y por si fuera poco, se espera que la demanda de agua aumente con el crecimiento de las poblaciones y urbanizaciones, con los cada vez mayores estándares de vida y con las crecientes demandas de alimentos, en particular en los países no pertenecientes a la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE)<sup>1</sup>.

Se hace necesaria por tanto la búsqueda de soluciones a este problema que, si no se toman las medidas oportunas, se cobrará un gran número de vidas humanas en numerosas regiones del planeta.

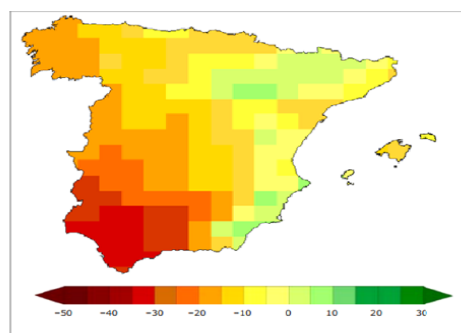
### **1.2.2 RECURSOS DE AGUA EN ESPAÑA**

España es un buen ejemplo de zona con elevados problemas de escasez de agua, sobre todo en su zona sur, en la que la disponibilidad de esta no es lo suficientemente alta para cubrir las demandas de usos agrícolas, turistas y sociales (véase Figura 1.3).

Tal y como muestra la Figura 1.4, la frecuencia de lluvias en España está actualmente decreciendo y se espera una caída dramática en las próximas décadas.



**Figura 1.3.** Mapa de lluvias en España, 2011. Fuente: [5]



**Figura 1.4.** Tendencia de lluvias (%) para el periodo 2011-2040. Fuente: [5]

<sup>1</sup> La OCDE es una organización fundada en 1961, que agrupa a 34 países miembros y su misión es promover políticas que mejoren el bienestar económico y social de las personas alrededor del mundo.

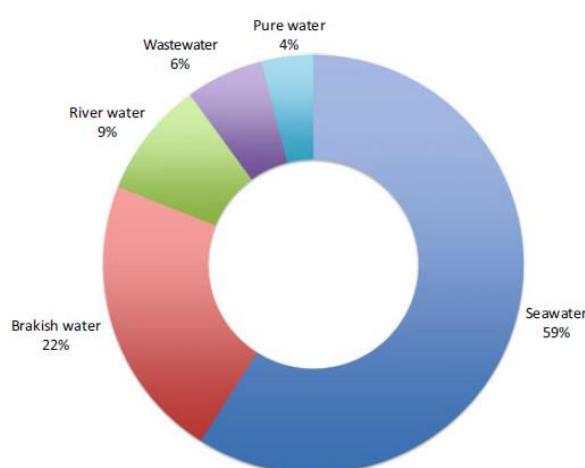
Según el informe de la EEA (*European Enviromental Agency*) del año 2004, España y Portugal serán los países de la Unión Europea más afectados por el cambio climático. [5]

### **1.2.3 ENERGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE AGUA: DESALINIZACIÓN**

Para poder hacer frente a la problemática de escasez de agua, es necesaria la aplicación de técnicas que permitan su obtención. Para ello se requiere energía eléctrica y en muchas ocasiones, térmica. Así por ejemplo, se necesita electricidad para la utilización de bombas que extraen, transportan, distribuyen y almacenan agua, o energía térmica para la alimentación de desalinizadoras.

La desalinización es considerada ser una de las opciones más sostenibles para vencer la problemática del agua, teniendo en cuenta que el agua del mar es, de todas las aguas presentes en el planeta, la más abundante (véase Figura 1.5). Este método de obtención de agua dulce es crucial en países del centro-este de África como Arabia Saudí, Emiratos Árabes o Kuwait, al ser estas las zonas con mayor sequía en el mundo. Se trata además de una tecnología en continuo crecimiento. De acuerdo a la IDA (*International Desalination Association*), la capacidad instalada de plantas de desalinización ha alcanzado en la actualidad los 90,1 millones de metros cúbicos al día en el año 2015, superando en 1 millón al registro del año 2014. [23]

El inconveniente de la desalinización es el enorme consumo de energía térmica que conlleva, lo que se traduce en elevados costes económicos.



**Figura 1.5.** Recursos de las diferentes aguas disponibles en el planeta, 2014. Fuente: [23]

El agua del mar constituye el 59% del agua total disponible en el planeta. Le sigue el agua salobre con el 22%. En menor proporción se encuentran el agua de los ríos (9%), las aguas residuales (6%) y el agua pura (4%). [26]

## **1.3 SITUACIÓN DE LA ENERGÍA**

### **1.3.1 PROBLEMÁTICA ENERGÉTICA Y ALTERNATIVAS SOSTENIBLES**

Rajendra Kumar Pachauri (2007), como antiguo presidente del grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), expone que la creciente sensibilización en el mundo sobre el futuro energético ha establecido una preocupación por garantizar la seguridad energética, controlar la contaminación provocada por la quema de combustibles y presentar batalla al cambio climático, que requiere la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero, en especial, de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). [32]

El cambio climático está aquí. El aplastante acuerdo de opiniones científicas lo afirma. Este enorme problema es provocado en gran medida por la actividad humana, entre la que destaca el consumo excesivo de combustibles fósiles. Si no se controla, las consecuencias serán nefastas para el ser humano. Además del calentamiento global, existen también otros retos energéticos actuales de gran relevancia, entre ellos: la creciente demanda energética mundial (alrededor de una subida del 37% para el año 2040 [23]), la excesiva dependencia de importaciones energéticas entre países (muchos de ellos políticamente inestables) o los precios volátiles del petróleo y del gas. Todos ellos han despertado una gran preocupación en los diferentes Estados mundiales, inquietados por una posible decadencia económica global.

Por todos estos motivos, se hace necesario el uso de las energías renovables para satisfacer la demanda energética y lograr un sostenible suministro energético en un futuro en el que se habrán agotado los recursos fósiles.

Dentro de las energías renovables, la energía solar se presenta como la fuente de energía con el potencial más grande de todas las fuentes renovables [36]. Dentro de esta, la tecnología de plantas solares de concentración (en inglés CSP *Concentrating Solar Power*), es la de mayor aplicación futura. Todas las tecnologías CSP se basan en la concentración de la radiación directa del Sol para la obtención de energía térmica a alta temperatura, utilizada a su vez para generar electricidad mediante ciclos de potencia convencionales (turbinas de vapor, turbinas de gas o motores Stirling).

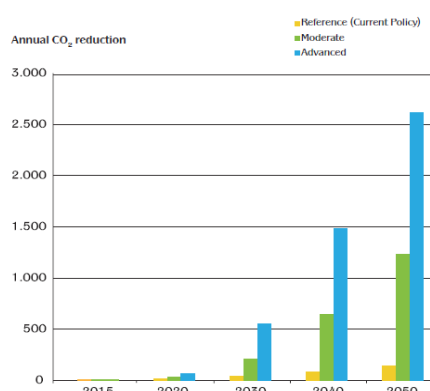
La ventaja de las plantas CSP comparadas con otros sistemas de energía renovable, como la energía solar fotovoltaica o la energía eólica, es que pueden sustituir casi en su totalidad el uso de combustibles fósiles mediante el sobredimensionamiento de los campos de colectores usados para concentrar la radiación solar. Además, poseen la capacidad para el almacenamiento de parte de la energía obtenida en sistemas de acumulación de calor.

El inconveniente es su elevado coste.

La implantación de tecnología CSP en el planeta se traducirá en la reducción de grandes cantidades de emisiones de CO<sub>2</sub> (ver Figura 1.6) y numerosos nuevos puestos de trabajo cada año, como se muestra en la Figura 1.7. [31]

Los valores mostrados, al ser predicciones, están clasificados en diferentes escenarios:

- **Escenario de Referencia:** Tiene en cuenta las políticas y medidas energéticas actuales, pero incluye consideraciones como nuevas políticas de reducción de contaminación, continuación de reformas del mercado del gas, etc.
- **Escenario Moderado:** Este escenario apuesta un poco más por el mercado de las energías renovables, incluyendo una mayor inversión en el sector como consecuencia de las necesidades energéticas.
- **Escenario Avanzado:** Se trata del escenario más ambicioso. Simula el caso de mayor crecimiento posible en el mercado de las tecnologías solares de concentración. La inversión en renovables es máxima para este escenario.



**Figura 1.6.** Ahorros anuales de CO<sub>2</sub> (en millones de toneladas) planteados con la tecnología CSP para los distintos escenarios. Fuente: [31]

La generación de empleo en los futuros escenarios es un factor crucial a tener en cuenta. Considerando las posibilidades de empleo que la tecnología CSP puede ofrecer, junto con la situación económica que atraviesan numerosos países, entre ellos España, hacen que apostar por este tipo de técnicas sea una acertada decisión.

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
<b>Jobs total</b>								
Reference (Current Policy)	18,904	16,981	27,061	29,180	42,760	62,545	63,878	70,197
Moderate	16,964	70,051	139,197	269,733	440,977	574,049	696,642	935,995
Advanced	12,985	169,237	418,664	712,674	931,683	1,072,328	1,198,116	1,443,265

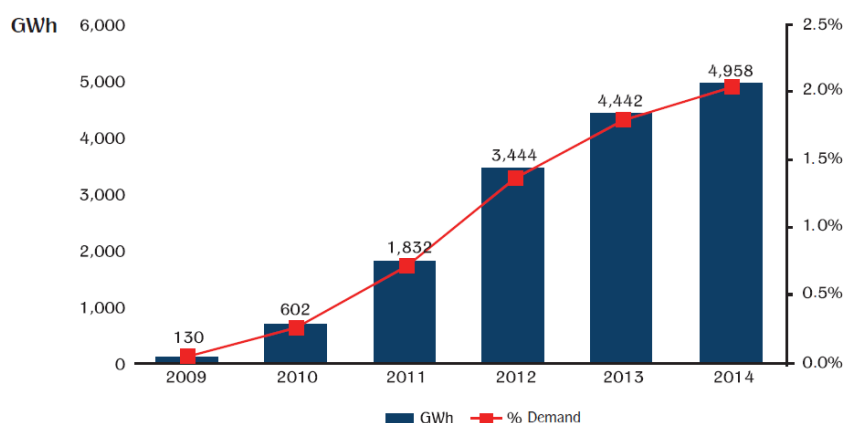
**Figura 1.7.** Perspectivas de puestos de empleo en tecnología CSP. Fuente: [31]

### 1.3.2 SITUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA CSP EN ESPAÑA

Existen numerosos proyectos de tecnología solar de concentración en España. El principal objetivo de estos es promover, de acuerdo al Gobierno de España, los sistemas de cero emisiones, generalmente denominados “Sistemas de energía verde”, que tienen como misión reducir los impactos ambientales. España es, a día de hoy, líder en el mercado de las tecnologías solares de concentración con una capacidad de 2375 MW instalados. [31]

La mayoría de las plantas CSP en España son de tecnología de colector cilindro parabólico, aunque también tiene instaladas plantas de torre solar, reflectores lineales Fresnel y disco parabólico.

La continua optimización de la producción y su perfecto acoplamiento a la curva de demanda energética ha potenciado enormemente las apuestas por la tecnología CSP (véase Figura 1.8). Uno de los objetivos logrados en el año 2015 fue el record de máxima contribución energética de la historia con un 8.5%. [31]

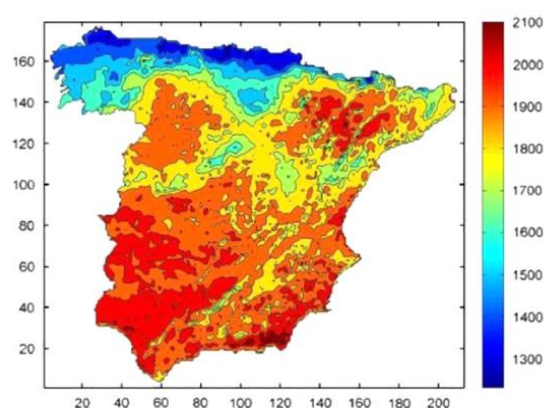


**Figura 1.8.** Producción anual eléctrica (GWh) y proporción de demanda energética cubierta con tecnología CSP en periodo 2009-2014. Fuente: [31]

Tal y como muestra la Figura 1.9, un elevado porcentaje de las plantas CSP instaladas en España se encuentran localizadas en latitudes por debajo de 40º Norte, ya que es en estas zonas donde se concentra la mayor radiación solar horizontal, parámetro clave para la implantación de centrales CSP (véase Figura 1.10).



**Figura 1.9.** Distribución geográfica de proyectos CSP en España, 2016 (rojo: operativas; amarillo: bajo construcción; verde: preasignadas).  
Fuente: <http://www.protermosolar.com>



**Figura 1.10.** Radiación Solar Horizontal en España (kWh/m2), 2014.  
Fuente: [5]

### **1.3.3 AGUA PARA LA PRODUCCIÓN DE ENERGÍA**

El agua es necesaria para la producción de todas las formas de energía. Para combustibles primarios, el agua se utiliza en la extracción de los recursos, en la irrigación de cultivos de biocombustibles, o en el refinado, procesado y transporte de petróleo. En generación de potencia, el agua permite la refrigeración de centrales termoeléctricas o la producción de electricidad en centrales hidroeléctricas.

Como se ha comentado en el apartado anterior, las tecnología CSP abarca grandes soluciones al problema energético. Sin embargo, no se debe despreciar un inconveniente de este tipo de centrales, el elevado consumo de agua que requieren.

#### **➤ Uso del agua en centrales termosolares de concentración (CSP)**

Los requerimientos de agua en una central solar de concentración dependen directamente de la tecnología empleada y sobre todo, del tipo de refrigeración utilizado (once-through, torre húmeda, refrigeración seca, refrigeración híbrida)<sup>2</sup>, pudiendo abarcar desde volúmenes despreciables hasta grandes cantidades de agua.

Así por ejemplo, una torre de refrigeración húmeda acoplada a un sistema CSP de colector cilindro parabólico, torre solar o tecnología Fresnel pueden tener necesidades de agua comparables a las de plantas de combustibles fósiles o nucleares, esto es de en torno a 570-1100L/MWh. [10]

<sup>2</sup> Los sistemas de refrigeración utilizados en las plantas de producción de potencia son comentados y comparados en el *Capítulo 3*. Además, la selección de uno de ellos para el caso estudio es objetivo del trabajo.



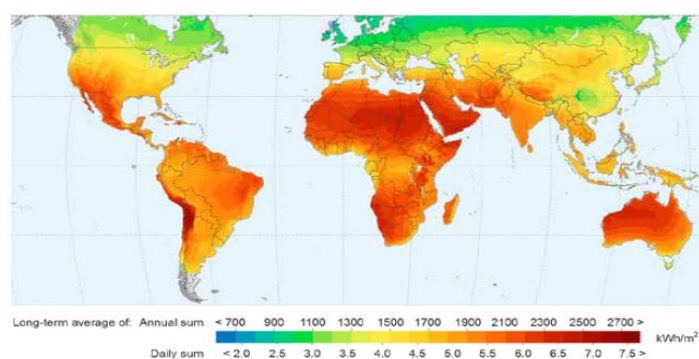
El uso del agua para plantas solares de concentración no supone un problema para las zonas del planeta donde existe un elevado abastecimiento de esta. Sin embargo, en países como España, con escasos recursos de agua y elevadas demandas de la misma en importantes sectores económicos como agricultura o turismo, la utilización de agua dulce para la refrigeración de plantas CSP entra en conflicto con otras actividades de elevada importancia (regadíos, consumo humano, etc.).

#### **1.4 CONCLUSIÓN: CSP+D**

Por un lado, la instalación de centrales solares de concentración CSP es una gran alternativa a los contaminantes y cada vez más limitados combustibles fósiles, pero requiere de grandes cantidades de agua para refrigeración y elevados índices de radiación solar, además de una considerable inversión económica.

Por otro lado, la desalinización del agua del mar es un proceso que, ante la inevitable escasez de los recursos de agua en las zonas más áridas del planeta, se evalúa como el futuro método de obtención de agua dulce. El problema reside en las grandes cantidades de energía que este proceso precisa.

Si se analiza y se estudia la situación, es fácil darse cuenta que las zonas de mayor escasez de agua coinciden con aquellas donde existen los índices de radiación solar más altos (ver Figura 1.11) y en consecuencia, donde más eficientes son las plantas CSP.



**Figura 1.11.** Mapa mundial de radiación solar directa, 2016. Fuente: [31]

La generación de electricidad y agua simultánea mediante energía termosolar y desalinización respectivamente (*Concentrating Solar Power and Desalination Plants CSP+D*) ofrece una solución sostenible al problema *Water and Energy*. Esta combinación genera electricidad limpia (implicando reducción del uso mundial de combustibles fósiles y los daños que estos conllevan), energía térmica capaz de alimentar la planta desalinizadora, y agua, un bien escaso en las zonas más áridas del planeta. Esta cogeneración es así capaz de salvar los enormes gastos de agua que requieren las plantas CSP (mayoritariamente en refrigeración), para utilizarlos en otros



sectores de elevada importancia económica (agricultura, turismo, etc.). Es por tanto, la generación de electricidad de una manera sostenible.

CSP+D se considera una medida preventiva que mitigará los existentes conflictos nacionales e internacionales causados por la escasez de agua y energía, y reducirá los riesgos potenciales económicos ligados al incremento de los costes de combustibles no renovables.

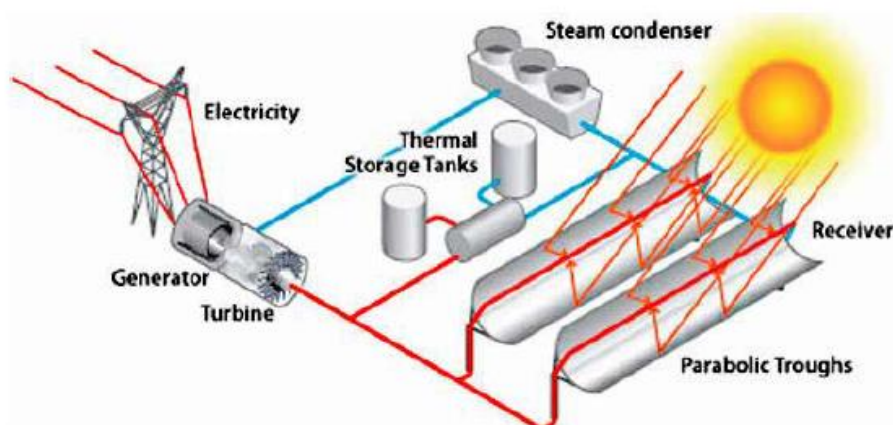
En definitiva, el problema del agua y la energía resueltos en un mismo sistema.

# CAPÍTULO 2

## TECNOLOGÍAS DE CONCENTRACIÓN SOLAR CSP

### 2.1 INTRODUCCIÓN

Las tecnologías de concentración solar (en inglés *Concentrating Solar Power* CSP) son sistemas que producen energía eléctrica de la misma manera que lo hacen otras plantas térmicas, haciendo circular vapor a través de una turbina conectada a un generador. La diferencia respecto a estas se encuentra en el modo de obtener la energía que produce ese vapor. Estas tecnologías captan la energía del Sol mediante la utilización de lentes o espejos que reflejan y concentran posteriormente la radiación solar sobre un fluido, obteniéndose así la fuente de energía que alimenta la planta (véase Figura 2.1).



**Figura 2.1.** Funcionamiento principal de un colector de concentración solar cilindro parabólico (derecha) junto a una estación de generación eléctrica (izquierda). Fuente: [31]

Durante este capítulo, se define el funcionamiento principal de las tecnologías solares de concentración CSP. Se analizan los componentes y características. A continuación, se estudian los diferentes tipos de sistema CSP y el nivel de implantación de cada uno de ellos en España. Finalmente, es objetivo del capítulo la comparación de los sistemas estudiados y la selección razonada de la modalidad más adecuada para diseñar y analizar una planta de CSP+D.

## **2.2 COMPOSICIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS SISTEMAS CSP**

Un sistema CSP consta de cuatro elementos fundamentales:

- Concentrador o absorbedor
- Receptor
- Medio de transferencia de calor
- Sistema de conversión de potencia

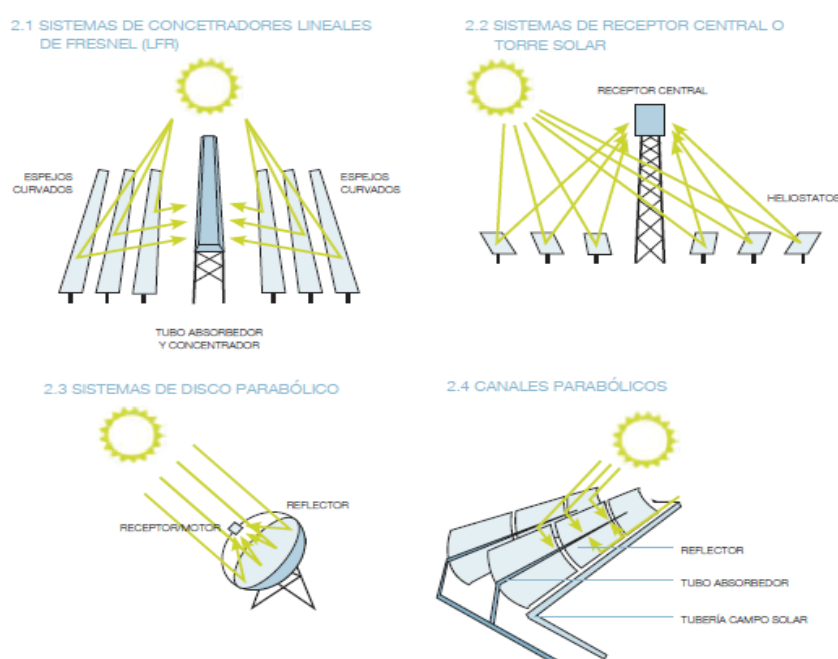
El proceso trabaja siempre de la misma manera. La radiación solar incide sobre el concentrador o absorbedor, quien dirige y concentra esta reflexión en el receptor, por el cual circula un fluido (medio de transferencia de calor) transformándose la energía solar en energía térmica. Este fluido caliente es el encargado de producir el vapor que circula por la turbina del sistema de conversión de potencia. La turbina produce energía eléctrica al tener acoplada un generador eléctrico.

Para la perfecta concentración de los rayos solares sobre el receptor y por tanto, para el correcto funcionamiento de la planta, es necesaria la implantación de sistemas de seguimiento en los concentradores que sean capaces de seguir la trayectoria del Sol durante el día y obtener en todo momento la máxima energía térmica. Para las horas nocturnas o días nublados, existen sistemas de almacenamiento que guardan la energía del Sol durante los momentos de alta radiación para utilizarla en los momentos que se necesite.

## **2.3 CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS CSP**

Actualmente, las tecnologías de generación eléctrica mediante tecnología CSP pueden clasificarse en cuatro grupos, como se muestra en la Figura 2.2:

- Sistemas de concentradores lineales de Fresnel
- Sistemas de receptor central o torre solar
- Sistemas de Disco Parabólico
- Sistemas de Colector Cilindro Parabólico o Canales Parabólicos



**Figura 2.2.** Tecnologías de concentración solar CSP existentes. Fuente: [28]

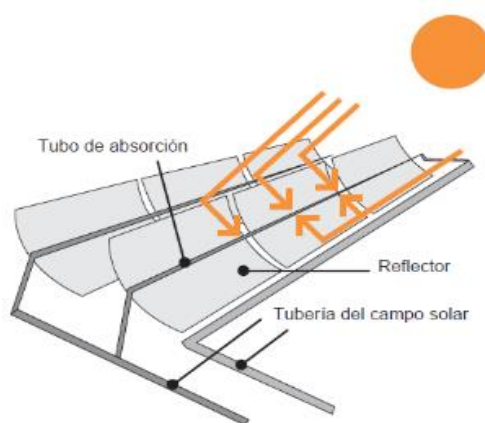
A su vez, pueden ser clasificadas en dos grupos, en función de si la concentración de los rayos solares por parte de los colectores se hace en una línea o en un punto. Los sistemas de concentración lineal incluyen a las tecnologías de colector cilindro parabólico y a los sistemas de concentradores Fresnel. Estos sistemas cuentan con tecnologías de seguimiento de la radiación solar en un único eje. Los de concentración en punto incluyen a discos parabólicos y torres solares, y sus sistemas de seguimiento son en dos ejes.

Cada una de estas tecnologías posee variaciones de diseño o diferentes configuraciones. Además, es importante destacar que, como consecuencia del tipo de funcionamiento que emplean estas tecnologías (concentración), estos sistemas trabajan exclusivamente con la radiación directa<sup>3</sup> del Sol, inutilizándose la radiación difusa y reflejada.

<sup>3</sup> Existen tres tipos de radiación solar: **Radiación directa:** Procedente directamente del Sol; **Radiación difusa:** Es la radiación que ha sido dispersada en la atmósfera. **Radiación reflejada:** Es la reflejada en la superficie terrestre. La suma de las tres radiaciones forma la **Radiación Global**. [13]

### 2.3.1 SISTEMAS DE COLECTOR CILINDRO PARABÓLICO

Los sistemas de colector cilindro parabólico consisten en la disposición de largos espejos (reflectores) con forma parábola sobre un campo con un sistema de seguimiento lineal. Los espejos reflejan la radiación solar directa hacia su línea focal, donde se coloca un tubo llamado receptor, tubo absorbedor o tubo de absorción (véase Figura 2.3 y Figura 2.4). Por el interior de este tubo circula un fluido, conocido como fluido de transferencia de calor, el cual recibe toda la radiación reflejada por los espejos, convirtiendo la energía solar en energía térmica. Este fluido puede llegar a alcanzar temperaturas de aproximadamente 400°C (500°C si se utiliza agua-vapor como fluido). [15]



**Figura 2.3.** Esquema de tecnología de colectores cilindros parabólicos. Fuente: [27]

Con el calor almacenado en este fluido, se genera el vapor que alimenta la turbina que obtiene electricidad.

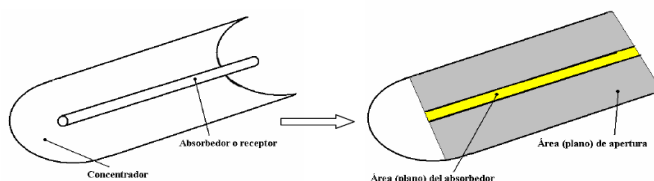
El fluido de transferencia de calor utilizado más común utilizado es aceite térmico, aunque el uso de agua-vapor o sales fundidas está recientemente siendo investigado.



**Figura 2.4.** Campo de colectores de tecnología cilindro parabólicos.  
Fuente: <http://www.torresolenergy.com>

La relación de concentración<sup>4</sup> en este tipo de sistemas se encuentra entre 50-90 soles.  
[9]

<sup>4</sup>RELACIÓN DE CONCENTRACIÓN (C): Relación entre área del concentrador (área de apertura) y el área del absorbedor que capta la radiación solar reflejada (ver Figura 2.5)



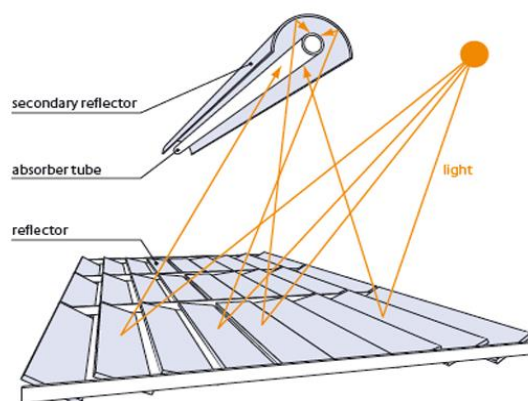
$$C = \frac{A_{\text{concentrador}}}{A_{\text{absorbedor}}}$$

**Figura 2.5.** Áreas planas del absorbedor y concentrador en un colector cilindro parabólico.  
Fuente: [15]

La tecnología de colectores cilindro parabólicos es la tecnología solar de concentración más madura y dominante actualmente en el mercado energético, particularmente en España y Estados Unidos, donde las capacidades instaladas de plantas en operación alcanza las cifras de 2370 MW y 1836 MW respectivamente. [31]

### **2.3.2 SISTEMAS DE CONCENTRADORES LINEALES FRESNEL**

En este tipo de tecnologías, al igual que en los colectores cilindros parabólicos, se realiza la concentración de radiación solar con enfoque lineal. La diferencia con estos se encuentra en el uso de espejos planos o ligeramente curvos, que son dispuestos en la parte inferior del sistema con diferentes ángulos para concentrar los rayos del sol en todos los puntos de un receptor fijo localizado varios metros por encima del campo de espejos (Figura 2.6).



**Figura 2.6.** Esquema de tecnología de concentradores lineales Fresnel.  
Fuente: <http://www.solareuromed.com/>

Cada línea de espejos está equipada con un sistema de seguimiento de un único eje, que se optimiza individualmente en cada espejo para asegurar una correcta concentración en el receptor fijo.

Estos sistemas tienen problemas de distorsión por astigmatismo. Por ello, es usual que cuenten con un segundo reflector (ver en Figura 2.6) situado sobre el tubo absorbedor, o bien un sistema de tubos paralelos que formen un receptor multitubo lo suficientemente grande para captar la mayor cantidad de radiación solar posible. [11]

El objetivo del diseño de estos sistemas ha sido el de conseguir una tecnología similar a la del colector cilindro parabólico, pero a menor coste, mayor simplicidad de diseño (incluyendo menor espacio ocupado) y menores pérdidas en los colectores. Sin embargo, los sistemas de Fresnel cuentan con peores eficiencias del ciclo de vapor con respecto a los cilindro parabólicos debido a que trabajan a menores temperaturas (280°C).

Entre los fluidos de operación más utilizados están el aceite, el agua y las sales fundidas.

Actualmente, más de 200 MW de receptores lineales Fresnel se encuentran en plantas en operación o bajo construcción en el mundo. En el año 2012, la primera planta comercial hizo su aparición en España. Es la planta Puerto-Errado 2 de 30 MW, situada en la provincia de Murcia (Figura 2.7). [31]



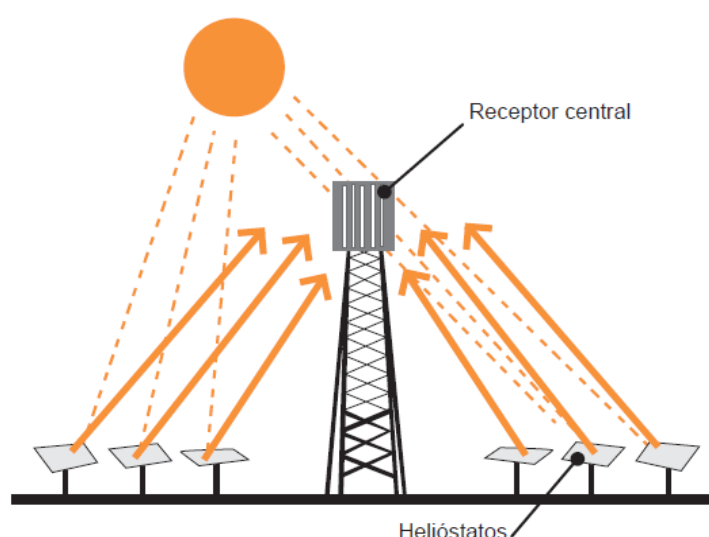
**Figura 2.7.** Central solar “Puerto-Errado 2”, Murcia. Fuente: <http://www.evwind.com/>



### 2.3.3 SISTEMAS DE RECEPTOR CENTRAL

Esta tecnología se basa principalmente en el reflejo de la radiación solar directa sobre un receptor solar situado en lo alto de una torre central a través de un conjunto de espejos llamados heliostatos (Figura 2.8). En el receptor la luz capturada es convertida en calor. Esta transformación se realiza por medio de un fluido (fluido de transferencia de calor) que puede ser agua-vapor, sales fundidas o aire.

El receptor es la parte fundamental de la tecnología, y en función de este, existirán diferentes configuraciones, pudiendo producirse el intercambio térmico directamente del receptor al fluido de trabajo del ciclo de potencia (configuración solo-primario) o produciéndose un segundo intercambio de calor entre el fluido de transferencia de calor y el fluido de trabajo del ciclo de potencia. [12]



**Figura 2.8.** Esquema de tecnología de receptor central y campo de heliostatos.  
Fuente: [27]

Los espejos o heliostatos constan de un sistema de seguimiento individual en dos grados de libertad, lo que contribuye a una mejor captación de la radiación solar

Dependiendo del tipo de receptor y del fluido de trabajo, pueden alcanzarse temperaturas desde 500°C hasta 1000°C. El alto valor de estas temperaturas no son sino consecuencia directa de las altas relaciones de concentración de estas tecnologías, que abarcan un rango de entre 600-1000 soles.

Existen numerosos proyectos de esta tecnología localizados en España, como las plantas PS10 de 11MW, PS-20 de 20MW y la de Gemasolar (Sevilla) de 20 MW con almacenamiento de sales (véase Figura 2.9).

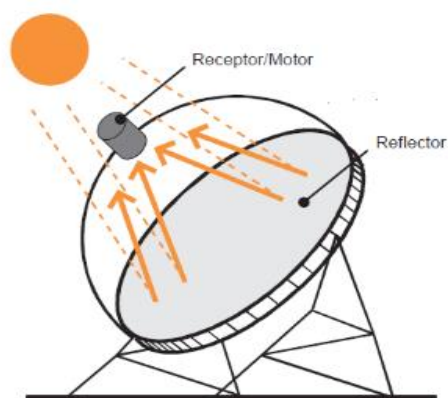




**Figura 2.9.** Central termosolar de receptor central "Gemasolar", Sevilla.  
Fuente: <http://www.torresolenergy.com>

#### **2.3.4 SISTEMAS DE DISCO PARABÓLICO**

Los discos parabólicos constan de un conjunto de espejos dispuestos en una misma superficie de paraboloide de varios metros de diámetro (concentrador), donde se produce el reflejo de la radiación solar directa sobre el punto focal de dicho paraboloide. Es en ese punto donde se coloca un motor Stirling cuyo foco caliente es el propio receptor y que funciona, por tanto, con un fluido de trabajo que ha sido calentado en el receptor solar (véase Figura 2.10 y Figura 2.11). El motor Stirling es capaz de producir electricidad directamente, sin necesidad de utilizar un ciclo de vapor.



**Figura 2.10.** Esquema de sistema de disco parabólico. Fuente: [27]

Los sistemas de disco parabólico tienen, al igual que las torres solares, un sistema de seguimiento en dos ejes, que asegura la perfecta concentración solar.



*Figura 2.11.* Fotografía de disco parabólico. Fuente: <http://riteca.gobex.es>

El fluido de trabajo más habitual, por sus buenas características de transmisión de calor, suele ser helio o hidrógeno, aunque también puede utilizarse nitrógeno o incluso aire.

Sus principales limitaciones son su baja potencia unitaria (inferior a 25 kW<sub>e</sub>) que presentan muchas dificultades a la hora de la producción eléctrica a gran escala y que al no disponer de sistemas de almacenamiento de electricidad, se desperdicia la carga no demandada. Por lo tanto, las aplicaciones de este tipo de tecnología están orientadas a la producción eléctrica para autoconsumo en lugares donde no llegue la red eléctrica (pozos, viviendas rurales, etc.).

## 2.4 COMPARACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS CSP

En la **Tabla 2.1** se especifican las características más importantes de cada una de las tecnologías anteriormente mencionadas.

**Tabla 2.1.** Comparación de las tecnologías de concentración solar (basadas en la referencia [9] excepto en donde se indica)

Características	Método de Concentración			
	Sistema de Concentración Lineal		Sistemas de Concentración en Punto	
Tecnología campo solar	Cilindro Parabólico	Lineal Fresnel	Receptor Central	Disco Parabólico
Estado del Arte	Comerciable	Recientemente Comerciable	Comerciable	En desarrollo
Coste Superficie Tecnología (€/m <sup>2</sup> )	300-350	200-250	300-400	>350
Costes de inversión(€/m <sup>2</sup> ) para SM1-SM2*	3500-6500	2500-4500	4000-6000	6000-10000 (solo SM1)
Capacidad Típica (MW)	10-250	5-250	10-100	0,1-1
Eficiencia solar máxima (%)	21	15	<20	31,25
Eficiencia solar anual(%)	10-16	8-12	10-16	16-29
Relación de concentración	50-90	35-170	600-1000	hasta 3000
Temperaturas de Operación (°C)	350-415	270-450	550-1000	750-900
Fluidos de Transferencia de Calor	Aceites Sintéticos Agua-Vapor	Aceites Sintéticos Agua-Vapor, Sales Fundidas	Aire, Sales Fundidas Agua-Vapor	Aire, Hidrogeno Helio, Nitrógeno
Ciclo termodinámico de potencia	Rankine	Rankine	Brayton/Rankine	Stirling/Brayton
Generador	Turbina Vapor	Turbina Vapor	Turbina Vapor Turbina Gas	Motor Stirling
Experiencia	Alta	Baja	Moderada	Moderada
Opciones de Almacenamiento Térmico	Sales Fundidas, Hormigón, Materiales de Cambio-Fase	Sales Fundidas, Hormigón, Materiales de Cambio-Fase	Sales Fundidas, Hormigón, Materiales de Cambio-Fase, Cerámicas	Almacenamiento no disponible
Combinación con desalinización	Simple	Simple	Simple	Simple
Aplicación	Generación de vapor sobrecalentado para red de plantas de potencia	Generación de vapor saturado y sobrecalentado para procesos térmicos y para red de plantas de potencia	Generación de vapor saturado y sobrecalentado para red de plantas de potencia	Sistemas autónomos, descentralizados y pequeños.
Requerimientos de agua (m <sup>3</sup> /MWh) [13]	3 (Refrigeración húmeda) 0,3 (Refrigeración aire)	2-3 (Refrigeración húmeda) 0,25 (Refrigeración aire)	3 (Refrigeración húmeda) 0,2 (Refrigeración aire)	0,05-0,1 (Limpieza de Espejos)

**Nota:** **SM = Múltiplo solar.** Es el cociente entre la potencia térmica absorbida por el fluido en el receptor y la potencia térmica pico requerida por el sistema turbina-generador. La energía térmica excedente es acumulada en el sistema de almacenamiento. Teóricamente:

- $SM > 2,4$ , se puede conseguir un funcionamiento continuado durante 24 horas al día en régimen nominal.
- $SM > 1$  implica un sobredimensionamiento de todos los componentes solares frente al bloque de potencia, con el correspondiente encarecimiento.

Los valores típicos que se manejan en la actualidad oscilan entre 1,2 y 1,8, lo cual correspondería a tiempos de autonomía de la planta a plena carga de 3 y 8 horas respectivamente Aunque este valor dependerá de la radiación anual disponible.

## **2.5 SELECCIÓN DE LA TECNOLOGÍA MÁS ADECUADA PARA CSP+D**

En principio, todos los sistemas de concentración solar presentados pueden ser usados para generar electricidad. Sin embargo, el objetivo en este trabajo es seleccionar la tecnología que mejor diseño, coste e integración con una planta de desalinización presente.

Tal y como se puede observar en la **Tabla 2.1**, la tecnología de colector cilindro parabólico es la más madura de los sistemas de concentración existentes. Todavía se desconocen las competencias que los sistemas de torre receptor central pueden batallar a los sistemas lineales en los rangos de temperaturas bajas (hasta 550 °C) para la generación de vapor.

Por otro lado, los sistemas de disco parabólico trabajan para sistemas aislados de baja potencia unitaria y no pueden hacer frente a la generación eléctrica a gran escala que se plantea en un proyecto CSP+D.

Además, los sistemas de concentración lineal presentan claras ventajas en comparación a los otros sistemas, como son menores costes, menor uso de materiales, construcción más sencilla y eficiencias mayores. Esto los hace los mejores candidatos para acoplar un sistema de desalinización.

Dentro de los sistemas de concentración lineal, los sistemas de cilindro parabólico presentan una mayor experiencia y confiabilidad que los sistemas Fresnel. Está comprobado el buen funcionamiento de los sistemas parabólicos a gran escala en plantas comerciales.

Por todo esto, y por ser la tecnología que ocupa el 90% de la capacidad de centrales solares de concentración instaladas, el presente trabajo utiliza una central de concentración solar basada en un sistema de colectores cilindro parabólicos para su acoplo a una central de desalinización.

# CAPÍTULO 3

## PLANTA TERMOSOLAR DE COLECTORES CILINDRO PARABÓLICOS

### 3.1 INTRODUCCIÓN

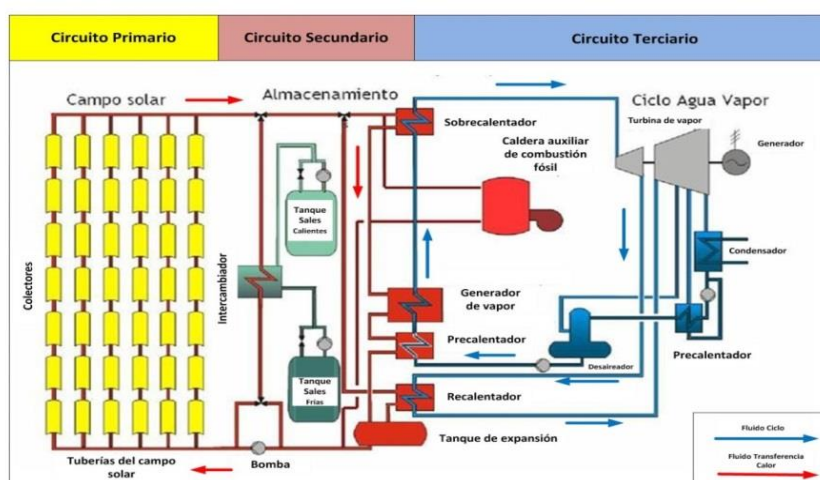
Una vez revisadas las principales tecnologías de concentración solar del mercado, es objetivo de este capítulo un análisis más detallado del sistema escogido (colector cilindro parabólico) así como su acoplo a la central de producción de vapor.

Se divide esta sección en tres partes. Por un lado, un análisis de las características y configuraciones de los elementos que conforman la planta termosolar. Por otro lado, un estudio del funcionamiento interno del ciclo de producción de vapor con el que se genera la electricidad, incluyéndose en este un modelizado para su simulación. Finalmente, es objetivo de este capítulo comparar los diferentes sistemas de refrigeración capaces de trabajar junto a una planta CSP, y la posterior selección de una de ellas para ser aplicada en este trabajo.

*Nota:* En este capítulo no se incluye información sobre la planta desalinizadora, pues su función es el análisis exclusivo de la tecnología solar empleada.

### 3.2 CONFIGURACIÓN Y ELEMENTOS DE LA PLANTA TERMOSOLAR

En la Figura 3.1 se muestra el esquema general de una central termosolar de colectores cilindro parabólicos. En ella pueden observarse los diferentes elementos que la conforman.



**Figura 3.1.** Esquema básico de una central termosolar de colectores cilindro parabólicos. Adaptado de <http://renewablengineering.blogspot.com.es>

En la planta se distinguen tres circuitos: el circuito primario (formado por el campo solar) , en el que se realiza la conversión de energía solar a energía térmica por medio

de los colectores; el circuito secundario, encargado del almacenamiento del calor obtenido mediante depósitos y el circuito terciario, cuya misión es la producción de potencia y electricidad mediante la instauración de un ciclo Rankine o ciclo Agua-Vapor.

Existen dos tipos de fluidos circulando por la planta, el fluido de transferencia de calor, que circula por los circuitos primario y secundario, y el fluido de trabajo ó fluido del ciclo, que hace su recorrido por el terciario (véase Figura 3.1).

El funcionamiento de la central es muy sencillo. El campo de captadores calienta el fluido de transferencia de calor que circula por el interior de los tubos con el método de la concentración solar. Este fluido transfiere el calor obtenido a los tanques de almacenamiento y al fluido de trabajo que forma parte del ciclo de potencia. Este último circula por el ciclo Rankine, en donde al pasar por las turbinas se genera electricidad.

Los componentes principales de una central de este tipo son:

- Campo de captadores o colectores (campo solar)
- Sistema de almacenamiento térmico
- Generador de vapor
- Caldera auxiliar de combustión fósil
- Tanque de expansión
- Sistema de conversión de potencia (Ciclo Rankine o Agua-Vapor)

Dentro de estos, existen subelementos que serán analizados dentro de cada sección.

### **3.2.1 CAMPO DE CAPTADORES O COLECTORES**

El campo de captadores es el área de terreno que contiene los concentradores que captan la radiación solar directa y la transfieren al fluido que circula por el tubo absorbedor. El campo solar está formado por filas de concentradores colocados en paralelo. Cada fila a su vez, esta formada por diferentes módulos de colectores colocados en serie (Figura 3.2). El número de colectores colocados en serie va en función de la diferencia de temperatura que se quiera proporcionar al fluido de transferencia de calor. El número de filas colocadas en paralelo determina sin embargo la potencia de la planta. El tamaño del campo solar se obtendrá como el producto de el número de colectores por el area de apertura de cada colector.



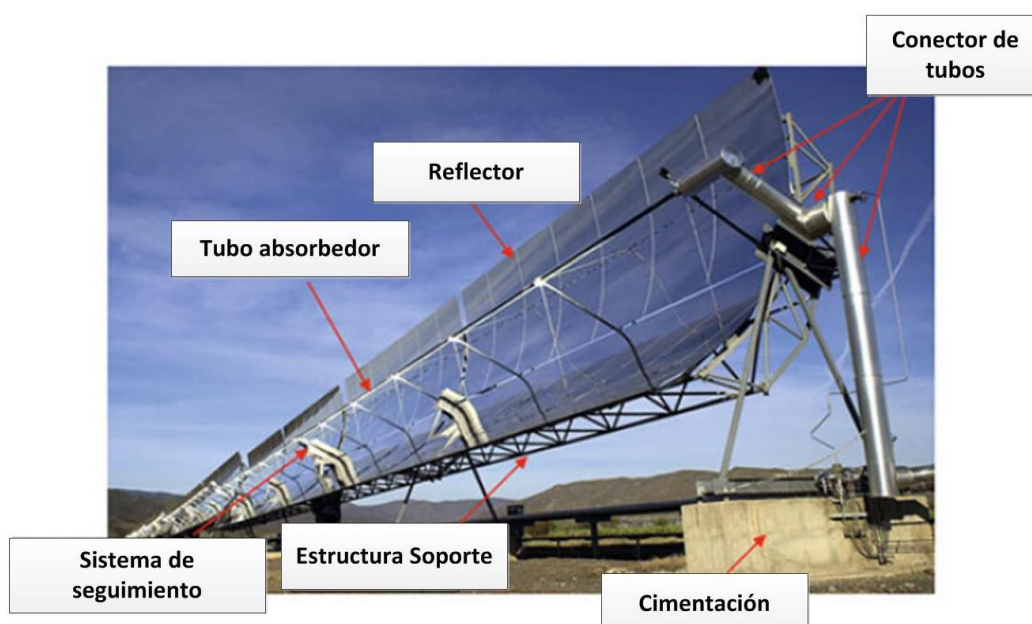


**Figura 3.2.** Disposición de colectores parabólicos en un campo solar.  
Fuente: <https://educamevial.wordpress.com>

### ➤ **COMPONENTES DEL COLECTOR**

Los principales componentes de un colector cilindro parabólico son, tal y como muestra la Figura 3.3:

- La estructura soporte y la cimentación
- El concentrador o reflector
- El tubo absorbedor o receptor
- El sistema de seguimiento solar
- Otros: Conector de tubos, soldaduras, etc.



**Figura 3.3.** Componentes del colector cilindro parabólico. Adaptado de [23]

### **Estructura soporte y cimentación**

La misión de la estructura es dar rigidez al sistema, a la vez que hace de intermediario entre la cimentación y el colector. El material del que se construyen los colectores ha sido siempre el metal, aunque está en investigación su construcción con materiales plásticos, fibra de vidrio o incluso madera. Es importante la implantación de una estructura de calidad puesto que pequeñas alteraciones o deformaciones en la misma afectarán a la concentración de la radiación y por tanto, a la producción energética.

Para la construcción de la estructura, existen dos configuraciones posibles, la de tubo de soporte central *torque tube* y la espacial *torque box* (véanse Figuras 3.4 y 3.5 respectivamente).



**Figura 3.4.** Colector tipo *torque tube*. Fuente: [15]



**Figura 3.5.** Colector tipo *torque box*. Fuente: [15]

La primera configuración es la utilizada en los colectores *LS-3*, *Senertrough* y *CS XXI*, entre otros, y la segunda, en los *LS-1*, *LS-2* que han derivado en los colectores *Eurotrough*, *Solargenix*, *SKAL-ET*, etc.

En cuanto a la cimentación, se encarga principalmente de soportar los colectores y anclarlos al suelo. Debe de soportar las cargas para las que está diseñado. Suelen ser de hormigón armado y su diseño está regido por las condiciones a las que se someterá el colector (peso, cargas de viento, tipo de terreno). [15]

### **Concentrador o Reflector**

Tal y como se lleva analizando, la función del concentrador es la de reflejar la radiación directa que incide sobre él y reflejarla sobre el tubo absorbedor. Los concentradores suelen estar hechos de chapa metálica, plástico o vidrio, siendo esta última la mejor opción de cara al menor deterioro que ocasiona su exposición a la intemperie. Estas láminas de vidrio son fabricadas en hornos especiales para darles la curvatura parabólica necesaria.

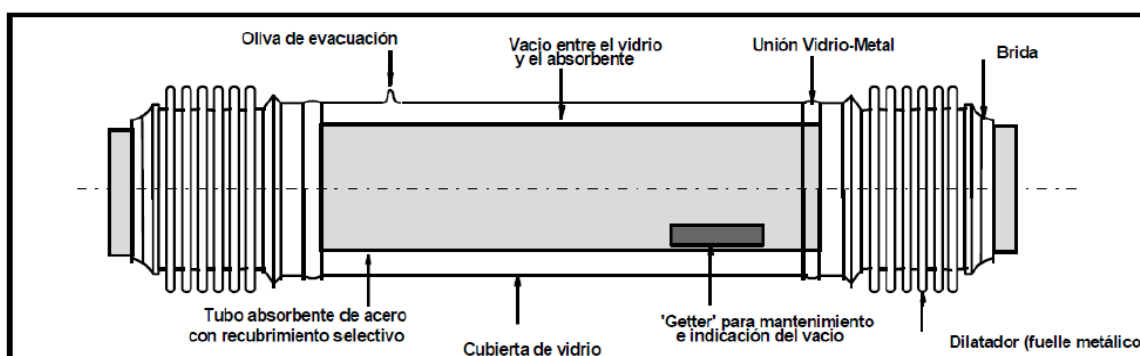
Para una mejor reflexión, se sitúa sobre los espejos láminas de plata o aluminio.



### Tubo absorbedor o receptor

Este tubo es el encargado de transformar la energía solar concentrada en energía térmica, la cual será absorbida por el fluido de transferencia de calor que circula por su interior. Se encuentra ubicado en la línea focal de la parábola y es considerado uno de los elementos más importantes de la tecnología.

El tubo receptor está formado por dos tubos concéntricos: un tubo interior metálico, por el que circula el fluido térmico, y un tubo exterior, de cristal. En el espacio situado entre medias se practica el vacío con el fin de reducir pérdidas al ambiente y asegurar la estanqueidad (véase Figura 3.6).



*Figura 3.6.* Esquema de un tubo absorbedor. Fuente: [15]

Respecto al tubo interior metálico, posee un recubrimiento selectivo que le dota de una elevada absorptancia (94%) y una baja emisividad (15%), dos propiedades que dotan al tubo de grandes características térmicas. [15]

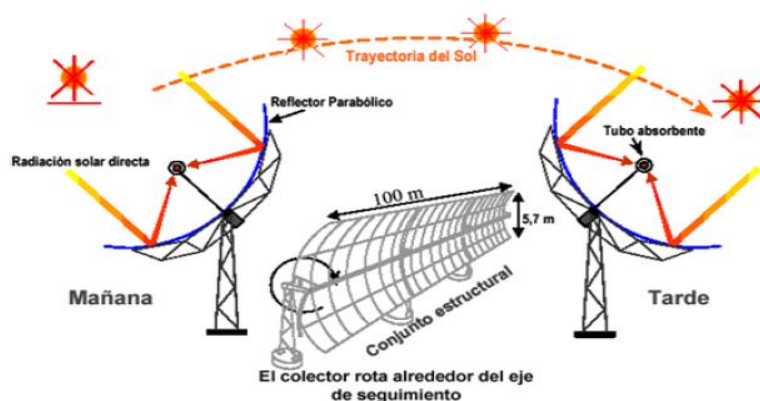
En cuanto al tubo exterior, tiene como función la reducción de pérdidas al ambiente por convección. Además, protege al tubo interior y a su pintura selectiva de posibles efectos adversos, como temporales meteorológicos desfavorables. La característica más importante que debe tener este tubo es una elevada transmitancia, para poder dejar pasar la mayor parte de radiación hacia el tubo interior.

Tal y como se observa en la Figura 3.6, la conexión entre el tubo interior metálico y el tubo exterior de cristal se realiza mediante la colocación de fuelles metálicos o dilatadores.

Por último, hay que analizar la función de los *getters*, piezas que absorben las moléculas originadas por la degradación del aceite. Al no ser los tubos metálicos superficies completamente impermeables, de no utilizar los *getters* podrían salir moléculas de aceite hacia el exterior, provocando la pérdida del vacío.

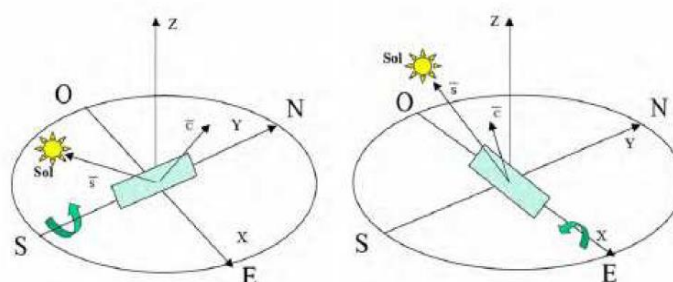
### Sistema de seguimiento solar

Para la correcta recepción de la radiación solar directa, es necesario un mecanismo de seguimiento que cambie la orientación del colector siguiendo la trayectoria del Sol. El sistema de seguimiento mas sencillo consta de un dispositivo, accionado de forma eléctrica o hidráulica, que gira la estructura completa alrededor de un eje (véase Figura 3.7).



**Figura 3.7.** Evolución del sistema de seguimiento de un colector durante un día. Fuente: [3]

Como regla genérica, las filas de colectores se alinean de forma que el eje de giro quede paralelo a la dirección Este-Oeste o bien a la Norte-Sur, siendo esta última la más habitual (véase Figura 3.8).



**Figura 3.8.** Orientación de colectores Norte-Sur (izquierda) y Este-Oeste (derecha). Fuente: [15]

### ➤ IMPLANTACIÓN Y DISEÑO DEL CAMPO DE COLECTORES

El diseño y análisis del campo solar, formado por el conjunto de colectores, es de gran importancia a la hora de construir una planta termosolar, puesto que de ellos depende una adecuada eficiencia del campo y, en consecuencia, del ciclo de generación de electricidad. Resulta adecuado realizar el análisis de los factores que se deben tener en cuenta a la hora de diseñar un campo solar.

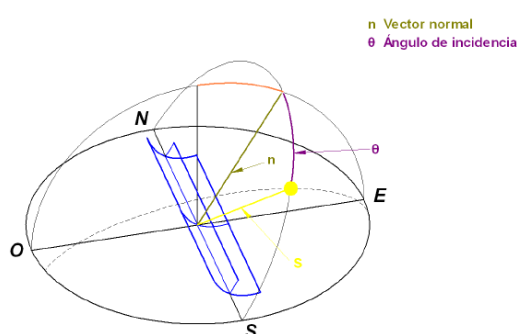
El conjunto de parámetros a tener en cuenta para la implantación y diseño de un campo de colectores incluyen:

- Ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre los colectores
- Orientación de los colectores
- Día y hora
- Longitud y latitud geográfica del lugar
- Radiación solar directa y temperatura ambiente
- Temperaturas de entrada y salida del campo de colectores
- Potencia térmica nominal del campo de colectores
- Tipo de colector empleado
- Tipo de fluido térmico

### Ángulo de incidencia de la radiación solar directa sobre los colectores

El ángulo de incidencia es el ángulo formado por el vector normal al plano de apertura del colector  $n$  y el vector del rayo solar  $s$  (véase Figura 3.9). El cálculo del ángulo de incidencia es esencial para poder calcular la energía útil que el campo de colectores puede proporcionar. Además, permite conocer el comportamiento térmico del colector.

El ángulo de incidencia se calculará como el arcocoseno del producto escalar de los dos vectores.



$$\theta = \cos^{-1}(\hat{n} \cdot \hat{s})$$

Figura 3.9. Ángulo de incidencia. Fuente: [15]

### Orientación de los colectores

Tal y como se ha expuesto anteriormente, la orientación de los colectores puede ser tanto en dirección norte-sur como en este-oeste. Si se dispusieran los colectores de una manera diferente, el ángulo de incidencia sería diferente de unas filas a otras y en consecuencia la radiación disponible, que es función del ángulo de incidencia, cambiaría entre las distintas líneas de colectores. Esto provocaría grandes dificultades

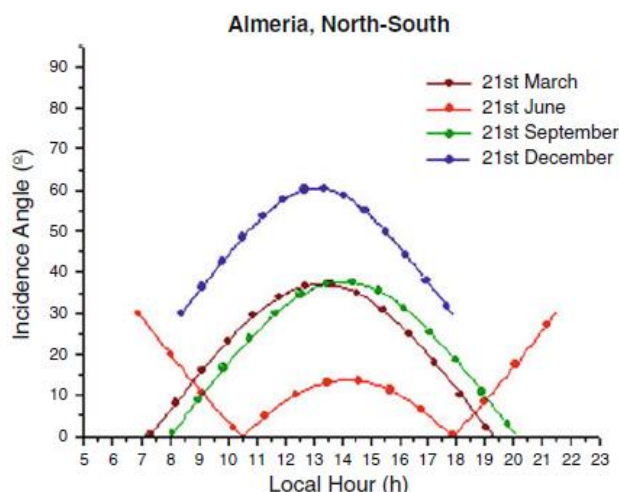
a la hora de controlar y mantener una temperatura del fluido de trabajo estable a la salida de los concentradores.

La orientación será escogida en función de los requerimientos de la planta. La potencia térmica que incide sobre un colector es función del ángulo de incidencia del mismo. Esta se calcula según la ecuación:

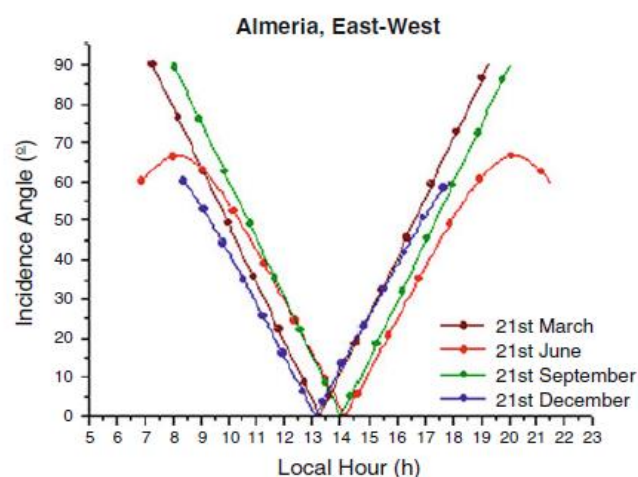
$$Q_{sol-colector} = A_{colector} \cdot DNI \cdot \cos(\theta)$$

Donde  $A_{colector}$  es el área de la superficie de apertura del concentrador, DNI es la radiación solar directa procedente del Sol y  $\theta$  es el ángulo de incidencia.

Cuanto menor sea el ángulo de incidencia, mayor será la radiación solar que incide sobre el colector. Por tanto, si se estudia la variación del ángulo de incidencia, se obtendrá la variación de la potencia térmica absorbida por el colector (véase Figura 3.10 y Figura 3.11).



**Figura 3.10.** Variación del ángulo de incidencia en diferentes momentos del año para una orientación norte-sur. Fuente: [23]



**Figura 3.11.** Variación del ángulo de incidencia para diferentes momentos del año para una orientación este-oeste. Fuente: [23]

En el caso de la orientación norte-sur, existen considerables diferencias en los ángulos de incidencia entre verano e invierno. Además, considerando que el número de horas de luz es mucho más amplio en verano que en invierno, la energía térmica obtenida en verano podrá ser de hasta 3 veces superior que la lograda en invierno para esta configuración.

Para la disposición este-oeste, las variaciones del ángulo de incidencia son mucho menores entre las diferentes estaciones del año. Esto causará una mayor estabilidad de potencia independientemente de si es verano o invierno.

Para las plantas comerciales de concentración solar, es preferida la orientación norte-sur porque, a pesar de la gran diferencia de energía térmica producida entre verano e invierno, la cantidad de energía producida en todo el año es superior que en la orientación este-oeste. [23]

### **Día y hora**

La elección del día y la hora de diseño dependerán de la orientación de los colectores elegida.

Si es una disposición norte-sur, la elección de un día de verano o de invierno influirá en gran medida en el funcionamiento de la planta. Si se elige un día de verano para el diseño, durante el invierno trabajará en condiciones inferiores a las nominales. Si por el contrario, se diseña en un día de invierno, durante el verano se desaprovechará parte de la energía absorbida puesto que la turbina del ciclo no será capaz de absorber la alta potencia térmica que le suministrarán los colectores. Por este motivo, y para no generar esas descompensaciones, se suelen seleccionar para estas orientaciones un día de otoño o primavera. [23]

Para el caso de la disposición este-oeste, el día elegido no influye en gran medida, debido a la poca variación del ángulo de incidencia.

En cuanto a la hora, es común seleccionar el mediodía ya que es el momento en el que el sol alcanza su máxima elevación y hay más estabilidad de radiación solar directa.

### **Longitud y latitud geográfica del lugar**

La longitud y latitud de la localización del campo solar de colectores son parámetros de gran importancia para los cálculos del vector solar y para la determinación de las condiciones meteorológicas del lugar.

### **Radiación solar directa y temperatura ambiente**

La radiación solar directa y la temperatura ambiente del punto de diseño son los correspondientes al día y hora de diseño escogido y son proporcionados por los datos meteorológicos de la localización del campo solar.

### **Temperaturas de entrada y salida del campo de colectores**

Las temperaturas de entrada y salida del campo solar dependen de las condiciones requeridas en el proceso de producción de potencia. Los valores de temperatura más

comunes para la entrada y la salida del campo solar son 295°C y 395°C respectivamente, suponiendo aceite térmico como fluido de trabajo. [23]

Cuanto mayor sea la temperatura de salida del campo de colectores, mejor funcionamiento tendrá el ciclo de potencia. El límite de temperaturas máximas alcanzadas depende del aceite en sí. Actualmente, no existen aceites térmicos viables económicamente, capaces de superar temperaturas de 400°C sin sufrir descomposición química.

### **Potencia térmica nominal del campo de colectores**

La potencia térmica que debe suministrar el campo solar está directamente relacionada con las especificaciones de potencia.

### **Tipo de colector empleado**

La elección del tipo de colector cilindro parabólico va en función de las temperaturas requerida para el ciclo agua-vapor, además del coste. Si se trata de un proceso de baja temperatura, los colectores de tamaño pequeño o mediano son los más apropiados. Si por el contrario, las temperaturas son elevadas, serán necesarios colectores de gran escala (LS-3, EuroTrough, SenerTrough, entre otros).

### **Tipo de fluido térmico utilizado**

En la actualidad, el fluido de trabajo más común en plantas de colector cilindro parabólico es el aceite térmico. El tipo de aceite empleado se elegirá en función de los parámetros de operación del campo solar (temperaturas máximas y mínimas) y la durabilidad del mismo.

Para temperaturas de trabajo inferiores a 295°C, se utilizan aceites cuyos puntos de congelación son lo suficientemente bajos (inferiores a 0°C), significando esto que no necesitan ser calentados en una caldera auxiliar en caso de condiciones ambientales muy desfavorables. El aceite *Therminol-55* se utiliza para estos casos.

Para temperaturas de alrededor de 400°C, el *Therminol VP-1*, cuya temperatura máxima es de 398°C, es el más adecuado. El principal inconveniente es el punto de congelación, que se sitúa en torno a 12°C, por lo que se requiere de calderas auxiliares en épocas de fríos intensos como el invierno.

Existen algunos aceites que permiten trabajar a temperaturas superiores a 400°C como el *Syltherm-800*, con una temperatura máxima de trabajo de 425°C y punto de congelación de -40°C. Sin embargo, los desmesurados costes de este aceite, sumados a la demostrada y peligrosa degradación que sufre este aceite con el paso del tiempo, han excluido este producto del mercado.

Como alternativa a los aceites, se están estudiando las sales fundidas. Estas se caracterizan por presentar menores costes específicos, mayores capacidades caloríficas y mayores temperaturas de trabajo con respecto a los aceites. A pesar de ello, la tecnología de sales fundidas no ha alcanzado una gran madurez, por lo que su uso se encuentra muy restringido.

Otra opción es la generación directa de vapor dentro de los tubos del colector. Este proyecto aseguran algunos investigadores, disminuirá costes y aumentará eficiencias. La generación directa de vapor permite alcanzar mayores temperaturas de trabajo, además de evitar el uso de intercambiadores de calor en la planta termosolar. [23]

### **3.2.2 SISTEMA DE ALMACENAMIENTO TÉRMICO**

De manera frecuente, las plantas termosolares presentan ciertos inconvenientes de cara a su correcto funcionamiento. Uno de ellos es sin duda la variabilidad de la insolación.

Para solucionar este inconveniente, se dispone de un sistema de almacenamiento o circuito secundario que es capaz de guardar parte de la energía térmica captada en los colectores durante las horas de sol, para entregarla al sistema de producción de potencia en momentos en los que no exista radiación solar directa disponible, como en días nublados o en horario nocturno.

Este sistema no está presente en todas las centrales, se limita a aquellas que precisen de un funcionamiento continuo.

Los tipos de almacenamiento pueden ser directos, cuando el fluido de almacenamiento es el mismo que el fluido que recorre los colectores solares, o indirecto, cuando es distinto.

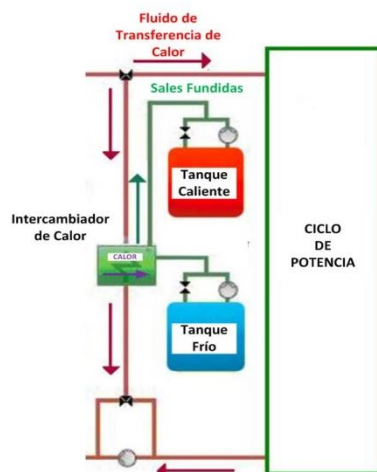
Existen múltiples configuraciones para este tipo de sistemas (un tanque, dos tanques, multitanque) pero el más simple y utilizado es el sistema dual (dos tanques) con sales fundidas. Las plantas termosolares de 50 MW de España suelen contener este tipo de almacenamiento (véase Figura 3.12).



**Figura 3.12.** Sistema de almacenamiento dual en la planta termosolar Andasol, Granada.  
Fuente: [12]

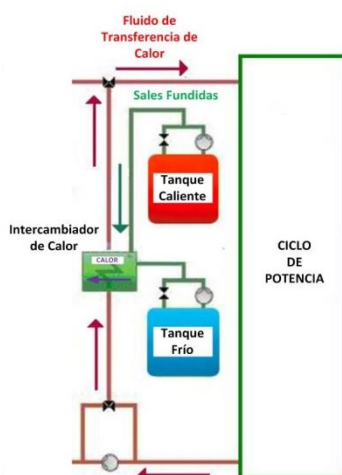


El almacenamiento dual es muy sencillo y eficaz. Durante las horas de radiación solar, el aceite caliente que proviene de los tubos absorbedores del campo de colectores transfiere su energía térmica a un intercambiador de calor, y este lo cede a las sales fundidas (“sal solar”, mezcla eutéctica de  $\text{NaNO}_3$  y  $\text{KNO}_3$ ), que circulan desde el tanque frío al tanque caliente, tal y como se muestra en la Figura 3.13. El tanque caliente almacena las sales a temperaturas de aproximadamente  $390^\circ\text{C}$ .



**Figura 3.13.** Diagrama de calentamiento de sales de almacenamiento (Funcionamiento en horas de sol). Adaptado de [6]

Cuando se precisa del calor almacenado en ausencia de radiación solar, las sales calientes circulan hacia el tanque frío, cediendo su calor al intercambiador de calor, donde el fluido de transferencia de calor lo recogerá, para cederlo posteriormente al ciclo de potencia (véase Figura 3.14). La temperatura de las sales en el tanque frío es de aproximadamente  $290^\circ\text{C}$ .



**Figura 3.14.** Diagrama de enfriamiento de sales de almacenamiento. Adaptado de [6]



El intercambiador utilizado suele ser un intercambiador tubo-carcasa, ya que es el que mejor comportamiento tendrá en relación a la diferencia de presiones existente entre fluido térmico y las sales.

### **3.2.3 GENERADOR DE VAPOR**

El generador de vapor constituye la interfase entre el sistema de obtención de energía solar y el sistema de producción de potencia ó ciclo de vapor. De esta manera, la energía solar térmica almacenada en el fluido de transferencia de calor se transmite a otro fluido (normalmente vapor de agua), encargado de generar electricidad en el ciclo Rankine.

Dependiendo del grado de calentamiento del vapor que sea objetivo, la composición del generador de vapor variará. En el esquema mostrado en la Figura 3.1, el vapor se calienta hasta el punto de sobrecalentamiento y por ello existen 4 partes:

1. **Precalentador o Economizador:** Este calentador es el primero que se encuentra el agua del ciclo. En él, se eleva la temperatura del vapor hasta la temperatura de saturación.
2. **Generador de Vapor:** En esta zona se produce el cambio de fase. Como es lógico, la temperatura del fluido de trabajo es la temperatura de saturación durante todo este tramo.
3. **Sobrecalentador:** Para sacar la mayor energía posible al fluido, se somete a este hasta altas temperaturas en las que se alcanza el estado de vapor sobrecalentado.
4. **Recalentador:** Tras una primera expansión en la turbina de alta presión, se somete al fluido a un recalentamiento para volver a obtener alta temperatura y energía, que será invertida en las sucesivas expansiones de turbina. La implantación de este elemento supone decisivas mejoras de rendimiento en el ciclo.

### **3.2.4 CALDERA AUXILIAR DE COMBUSTIÓN FÓSIL**

Debido a la gran dificultad para realizar previsiones meteorológicas fiables, y de cara a asegurar la demanda eléctrica necesaria cada día, se instaura en las centrales termosolares una caldera auxiliar de combustible fósil capaz de aportar la energía que no pueda aportar el sol en determinados días de condiciones atmosféricas desfavorables. Su función es similar y complementaria a la realizada por el sistema de almacenamiento de sales.

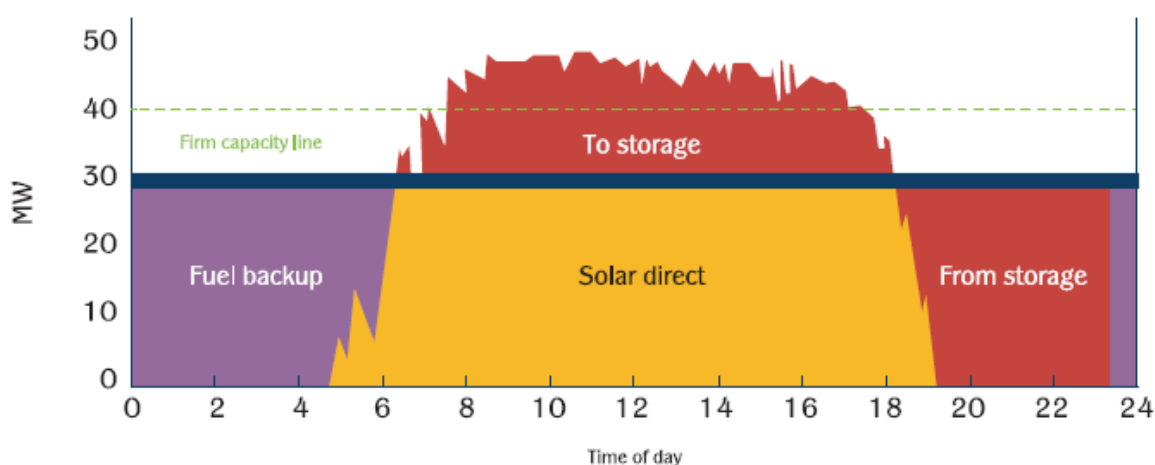
Las centrales solares que cuentan con generadores de calor provenientes de otras fuentes se conocen como **centrales híbridas**.

Las ventajas de la hibridación son:

- Aumentar la eficiencia de conversión de la potencia solar recogida
- Gran disponibilidad energética para poder cubrir posibles picos de demanda
- Hacer frente a la variabilidad de la radiación solar
- Reducción del tiempo de puesta en marcha del fluido de trabajo
- Minimización de los costes de generación
- Evitar congelación del fluido de trabajo.

Los combustibles utilizados pueden ser combustibles fósiles, biomasa o biogás.

Tras estudiar los sistemas de almacenamiento térmico y la hibridación con fuentes auxiliares de calor, se puede observar en la Figura 3.15 como se aumenta considerablemente la duración operativa de la central en comparación a la ausencia de estos.



**Figura 3.15.** Funcionamiento de una planta termosolar de concentración que combina almacenamiento térmico e hibridación. Fuente: [31]

En las horas de madrugada la central funciona con la caldera auxiliar y en las últimas horas del día trabaja con el almacenamiento térmico recogido durante las horas de plenitud solar.

### **3.2.5 TANQUE DE EXPANSIÓN**

Debido al amplio rango de temperaturas a las que se ve sometido el fluido térmico de transferencia de calor (aceite térmico normalmente) en una central termosolar, se experimentan grandes variaciones en las propiedades de este. Uno de los cambios mas significativos es la variación del volumen de fluido como consecuencia de la variación de temperatura. Debido a que los líquidos son incompresibles, el aumento de volumen de fluido genera altas presiones que afectan directamente a los elementos

del sistema (tuberías, válvulas, bombas, etc) generando roturas y averías que ocasionan pérdidas de estanqueidad en el circuito y derrame del fluido térmico.

Para evitar estos problemas, se instala en la central un depósito o vaso de expansión, consistente en un tanque dividido en dos partes separadas por una membrana elástica. En una de las partes se encuentra el fluido térmico, y en la otra se introduce un gas inerte, como por ejemplo nitrógeno (véase Figura 3.16). Cuando aumenta la temperatura del fluido térmico por encima de la temperatura de operación, este se dilata, incrementándose la presión en el circuito. La membrana absorbe esta sobrepresión, transfiriéndola al gas inerte. En caso de operar a temperaturas inferiores a las de operación, el vaso de expansión permite la contracción del aceite. [14]



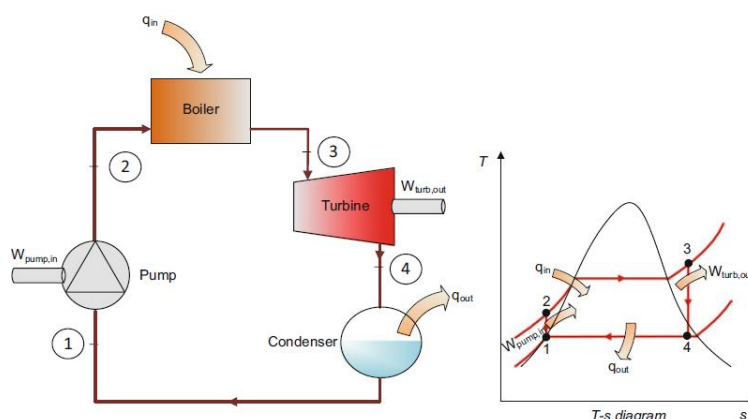
*Figura 3.16.* Tanque de expansión. Fuente: <http://ingemecanica.com/>

### **3.2.6 SISTEMA DE CONVERSIÓN DE POTENCIA**

El sistema de conversión de potencia es la parte mas importante de una planta termosolar, puesto que es el lugar donde se aprovecha la energía térmica obtenida en los concentradores solares. Corresponde al circuito terciario de la central.

En las centrales termosolares y dentro de ellas en las de tecnología cilindro parabólico, se utiliza el ciclo Rankine o ciclo de agua-vapor, que trabaja con agua como fluido de trabajo.

En la Figura 3.17 se representa el esquema básico de un ciclo Rankine ideal con sus elementos: bomba, calentador, turbina y condensador. También aparece representado el diagrama Temperatura-Entropía (T-S) propio de estos ciclos.

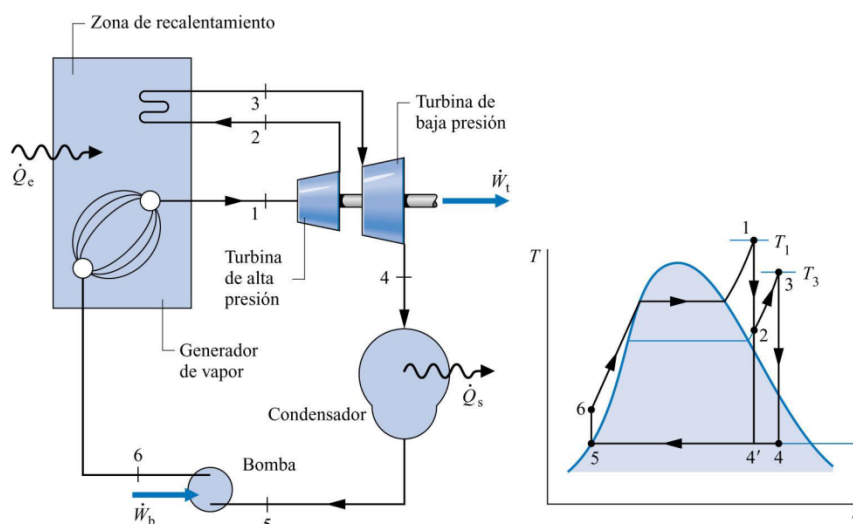


**Figura 3.17.** Diagrama de un ciclo Rankine simple ideal (izquierda) con su respectivo diagrama T-S (derecha). Fuente: [23]

El funcionamiento es muy sencillo. El agua que circula por el ciclo se calienta al pasar por la fuente de calor (caldera, generador de vapor, etc). Una vez alcanzado el punto de máxima temperatura (Punto 3 en la Figura 3.17), se expande en una turbina transformándose así la energía térmica en energía mecánica y de esta a eléctrica si la turbina se encuentra acoplada a un generador. El vapor sobrecalentado a la salida de la turbina (Punto 4) se hace pasar por un condensador en el que se devuelve al fluido al estado de líquido saturado (Punto 1). En este punto, se hace pasar al fluido por una bomba que eleva su presión hasta la necesaria a la entrada del generador de vapor. La eficiencia de un ciclo Rankine simple real se encuentra en torno a un 36%. [4]

Los ciclos de producción de potencia acoplados a una planta solar de colector cilindro parabólico llevan además muchos elementos adicionales que mejoran la eficiencia del ciclo.

Entre ellos se encuentran el recalentador, que fue comentado como parte del generador de vapor, el cual provoca que la expansión de la turbina se haga en dos partes, en lugar de en una. En la primera parte (turbina de alta presión), el vapor se expande hasta una presión intermedia generando trabajo y posteriormente es recalentado en el generador de vapor hasta una temperatura cercana a la que entró el vapor en la primera expansión. En la segunda expansión (turbina de baja presión), se produce de nuevo trabajo reduciendo la presión del vapor hasta la presión de condensación (véase Figura 3.18). La introducción de un recalentador mejora la eficiencia del ciclo en torno a un 4-5 %. [4]

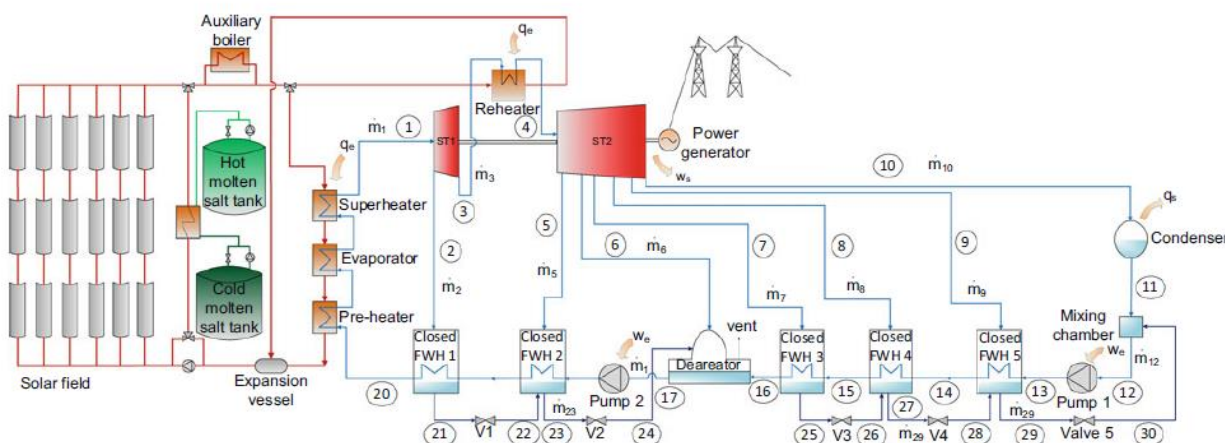


**Figura 3.18.** Diagrama de un ciclo Rankine ideal con recalentamiento (izquierda) con su respectivo diagrama T-S (derecha). Fuente: [20]

Otra alternativa para incrementar el rendimiento del ciclo Rankine es incrementar la temperatura del líquido bombeado (agua de alimentación), antes de ser introducido en la caldera o generador de vapor. Este elemento se conoce como *feedwater heater* (FWH). El FWH es un intercambiador de calor entre el líquido bombeado (fluido frío) y el vapor de agua extraído de la turbina (fluido caliente). De este modo, se sacrifica parte del trabajo en la turbina para emplearlo en precalentar el líquido bombeado y así ahorrar gasto energético de calor al generador de vapor. Los FWH pueden ser abiertos o cerrados. Los FWH abiertos ó desaireadores son básicamente mezcladores: el vapor que se extrae de la turbina es mezclado con el agua bombeada. En los cerrados sin embargo, no se produce mezcla, sino que se realiza la transferencia de calor mediante intercambiadores de calor en los que el calor extraído de la turbina es transferido al agua bombeada. Se calcula que la introducción de FWH en un ciclo de producción de vapor puede aumentar la eficiencia del ciclo hasta valores comprendidos entre el 38 y el 40%. [4]

➤ **MODELIZADO DEL CICLO**

El uso simultáneo de todos los elementos comentados anteriormente dan lugar a una central de generación de vapor como las empleadas en plantas CSP (véase Figura 3.19). En ella pueden observarse, dentro del ciclo de potencia, los FWHs abiertos (*desareator*) y cerrados, las bombas (*Pump*), las turbinas de alta y de baja presión (*ST1* y *ST2* respectivamente), el condensador y los componentes del generador de vapor.



**Figura 3.19.** Esquema completo de una planta termosolar de colectores cilindro parabólicos. Fuente: [23]

A continuación se detalla el ciclo paso a paso. Partiendo del punto 20, en el que se tiene un flujo de líquido (corriente de alimentación) a una determinada temperatura, se hace pasar a este flujo por el generador de vapor (precalentador, evaporador y sobrecalentador). El vapor del ciclo sobrecalentado (punto 1) pasa primero a través de una turbina de alta presión (*ST1*), donde se expande, obteniendo trabajo, hasta alcanzar una presión determinada. De esta turbina, se produce una extracción de vapor o *sangrado* (Punto 2) para alimentar al primer feedwater heater cerrado (*FWH1*). En este, el calor del vapor procedente de la turbina es transferido hacia la corriente de alimentación, sin mezclarse las dos corrientes. A las salidas del FWH1 se obtiene por un lado, vapor condensado (punto 21) y por el otro, agua de alimentación a alta temperatura (punto 20). El vapor condensado resultante se introduce en el siguiente FWH (*FWH2*) para aprovechar el calor sensible de esta corriente. Esto se produce tras pasar por una válvula (*válvula 1*), quien reduce la presión de la corriente hasta la presión del FWH correspondiente (*FWH2*). Además, la válvula cumple una importante misión, evitar evaporaciones flash, que ocurren si se introduce una corriente líquida en una cámara a una presión inferior a la de saturación de dicho flujo.

Volviendo a la turbina de alta presión (*ST1*), la parte que no ha salido por el sangrado continua su expansión, obteniendo de nuevo trabajo, y se hace circular a este por el recalentador. En este, el vapor es sobrecalentado de nuevo por la energía térmica acumulada en el recalentador (punto 4). Este vapor sobrecalentado se introduce en la turbina de baja presión (*ST2*), donde se expande hasta la presión del condensador. En ese intervalo de presiones, se realizan 5 sangrados: 4 para FWHs cerrados (FWH 2-5) y 1 para el FWH abierto o desaireador. En este último el vapor extraído de la turbina (Punto 6) se mezcla de manera directa con el agua de alimentación, transfiriéndose a esta la entalpía de cambio de fase del vapor. Además el FWH abierto elimina el oxígeno y los gases no condensables del agua de alimentación, y evita problemas de corrosión en el sistema de generación de potencia. Los FWH 2-5 tienen el mismo funcionamiento que el comentado para el FWH1.

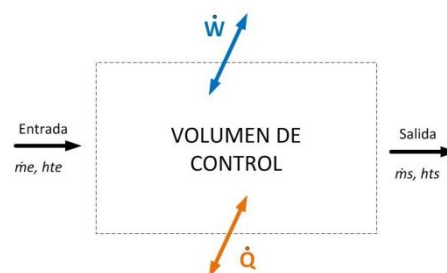
Finalmente, el vapor que sale de la turbina de baja presión (punto 10) debe ser condensado, transfiriendo su calor a un medio de refrigeración a través del condensador. El calor es por tanto evacuado al ambiente. El flujo que sale del condensador (normalmente líquido saturado), es bombeado hasta en dos ocasiones antes de su llegada al generador de vapor (bomba de condensados *Pump 1* y bomba de alimentación *Pump 2*) para alcanzar las presiones del desaireador y del generador de vapor respectivamente. Durante este trayecto, además de ser bombeado, es precalentado por las aportaciones del calor cedido en los FWH. Finalmente, se alcanza el precalentador (punto 20), repitiéndose así el ciclo.



### ➤ ECUACIONES CORRESPONDIENTES AL CICLO

Todos los elementos del sistema cumplen la ecuación general de la energía, que se define como:

$$\frac{dEV_c}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \sum \dot{m}_e \cdot h_{et} - \sum \dot{m}_s \cdot h_{st}$$



**Figura 3.20.** Diagrama de proceso termodinámico en un volumen de control genérico

donde:

- $\dot{Q}$  es la potencia térmica absorbida por el volumen de control (signo positivo)
- $\dot{W}$  es la potencia mecánica que se realiza sobre el volumen de control (signo positivo)
- $\dot{m}$  es el flujo másico del fluido del ciclo
- $h_t$  es la entalpía total específica del fluido
 

$$h_t = h + \frac{v^2}{2} + gz$$

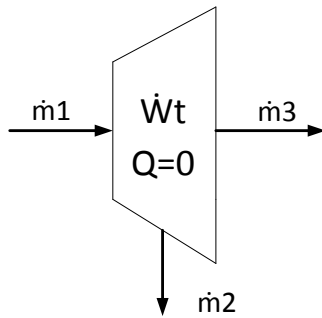
- $h$  es entalpía simple
  - $v$  es velocidad
  - $g$  aceleración de la gravedad
  - $z$  componente de altura
- $e$  entrada al volumen de control
- $s$  salida del volumen de control

Es importante conocer el comportamiento de cada elemento del ciclo de vapor frente a la ecuación general de la energía, pues de esa manera se conocen los parámetros de cada punto del ciclo, los cuales permitirán deducir la eficiencia y comportamiento del ciclo.

El ciclo de potencia se va a modelizar asumiendo que las bombas, turbinas y válvulas son adiabáticas y operan en estado estacionario. Además, los cambios en la energía cinética y potencial pueden considerarse despreciables, así como los cambios de estado en el fluido entre la entrada y salida de cada componente.

De esta manera, las ecuaciones quedan simplificadas de la siguiente forma para los elementos del ciclo de potencia:

○ **TURBINA**



**Figura 3.21.** Diagrama de proceso de una turbina adiabática

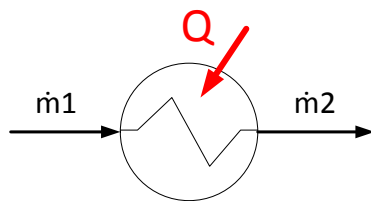
**Balance de Masa**

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2 + \dot{m}_3$$

**Balance de Energía**

$$\dot{W}_t = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_2) + \dot{m}_3 \cdot (h_2 - h_3)$$

○ **GENERADOR DE VAPOR**



**Figura 3.22.** Diagrama de proceso de un generador de vapor

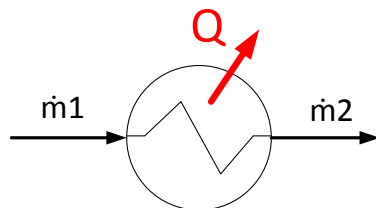
**Balance de Masa**

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

**Balance de Energía**

$$\dot{Q}_{gen.vapor} = \dot{m}_1 \cdot (h_2 - h_1)$$

○ **CONDENSADOR**



**Figura 3.23.** Diagrama de proceso de un condensador

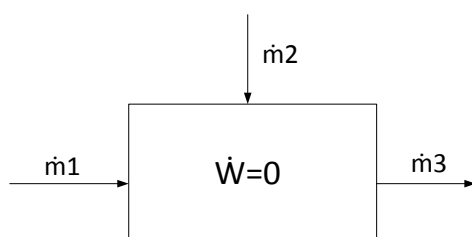
**Balance de Masa**

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

**Balance de Energía**

$$\dot{Q}_{condensador} = \dot{m}_1 \cdot (h_1 - h_2)$$

### ○ CÁMARA DE MEZCLA



**Figura 3.24.** Diagrama de proceso de una cámara de mezcla

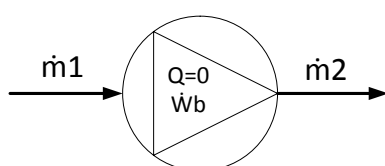
#### Balance de Masa

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 = \dot{m}_3$$

#### Balance de Energía

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_2 \cdot h_2 = \dot{m}_3 \cdot h_3$$

### ○ BOMBA



**Figura 3.25.** Diagrama de proceso de una bomba adiabática

#### Balance de Masa

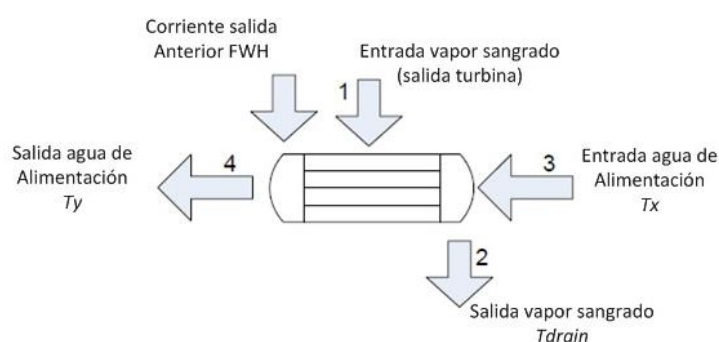
$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

#### Balance de Energía

$$\dot{W}b = \dot{m}_1 \cdot (h_2 - h_1)$$

### ○ FEEDWATER HEATER CERRADO

En un FWH cerrado ideal, el agua de alimentación se calienta hasta la temperatura del vapor. Sin embargo, en un FWH real, la salida del agua de alimentación se encuentra a una temperatura inferior a la del vapor. Existen dos parámetros que evalúan la transferencia de calor en un FWH. Son el *TTD* y el *DCA*.



**Figura 3.26.** Diagrama de proceso de un FWH cerrado

- *TTD (Terminal temperatura difference)* definida como la diferencia entre la temperatura de saturación del vapor de la salida de la turbina ( $T_{sat\ 1}$ ) y la temperatura de salida del agua de alimentación del FWH ( $T_y$ )

$$TTD = T_{sat\ 1} - T_y$$

- *DCA (Drain cooler approach)*, usado para deducir el nivel de presencia de líquido y definido como la diferencia entre la temperatura de salida del vapor del FWH ( $T_{drain}$ ) (Corriente de drenaje) y la temperatura de entrada de la corriente principal o agua de alimentación al FWH ( $T_x$ )

$$DCA = T_{drain} - T_x$$

Estos dos parámetros serán utilizados para determinar las temperaturas de drenaje ( $T_{drain}$ ) y de salida del agua de alimentación ( $T_y$ ) en el ciclo.

**Balance de masa general:**

$$\text{Flujo Vapor: } \dot{m}_1 + \dot{m}_D = \dot{m}_2$$

$$\text{Flujo Agua de Alimentación: } \dot{m}_3 = \dot{m}_4$$

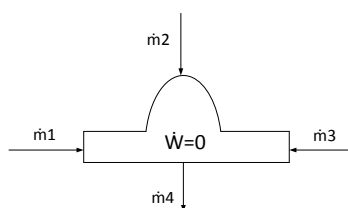
**Balance de energía general:**

$$Q_{FlujoVapor} = Q_{FlujoAgua}$$

$$\dot{m}_4 \cdot h_4 - \dot{m}_3 \cdot h_3 = \dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_D \cdot h_D - \dot{m}_2 \cdot h_2$$

#### ○ **FEEDWATER HEATER ABIERTO o DESAIREADOR**

Ecuación muy similar a la de la cámara de mezcla, pero con un término más. Tiene 3 entradas en lugar de 2:



**Figura 3.27.** Diagrama de proceso de un desaireador

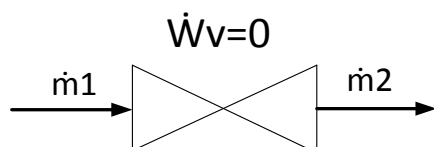
**Balance de Masa**

$$\dot{m}_1 + \dot{m}_2 + \dot{m}_3 = \dot{m}_4$$

**Balance de Energía**

$$\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_2 \cdot h_2 + \dot{m}_3 \cdot h_3 = \dot{m}_4 \cdot h_4$$

○ VÁLVULA



**Figura 3.28.** Diagrama de proceso de una válvula isoentálpica

**Balance de Masa**

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

**Balance de Energía**

$$h_1 = h_2 = cte \quad (\text{Válvulas Isoentálpicas})$$

○ RENDIMIENTO DEL CICLO

$$\eta_{\text{ciclo}} = \frac{W_{\text{turbinas}}}{Q_{\text{aportado}}} = \frac{Q_{\text{aportado}} - Q_{\text{cedido}}}{Q_{\text{aportado}}} = 1 - \frac{Q_{\text{cedido}}}{Q_{\text{aportado}}}$$

$$W_{\text{turbinas}} = W_{\text{turbinaST1}} + W_{\text{turbinaST2}}$$

$$Q_{\text{aportado}} = Q_{\text{Precalentador}} + Q_{\text{Evaporador}} + Q_{\text{Sobrecalentador}} + Q_{\text{Recalentador}}$$

$$Q_{\text{cedido}} = Q_{\text{condensador}}$$

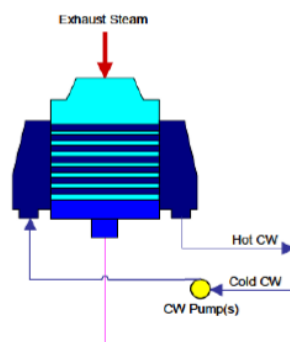
*Nota:* Se han despreciado los trabajos que consumen las bombas en el cálculo del rendimiento debido a su bajo valor con respecto al trabajo obtenido en la turbina.

### 3.3 SISTEMAS DE REFRIGERACIÓN UTILIZADOS EN PLANTAS CSP

El calor que absorbe el condensador del ciclo debe evacuarse de alguna manera. Un importante aspecto a tener en cuenta en las plantas CSP es la selección del método de refrigeración mas apropiado.

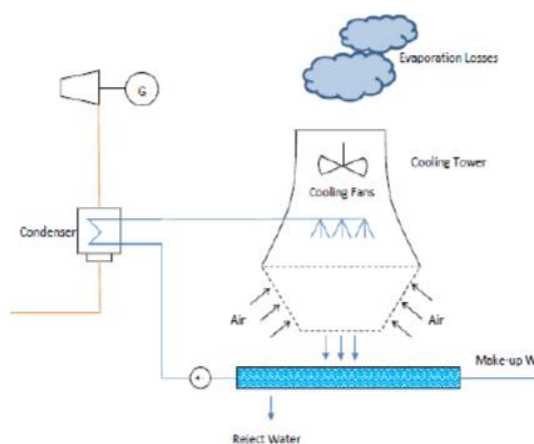
Las plantas actuales CSP operan frecuentemente con sistemas de refrigeración húmeda. Dentro de estos sistemas existe el enfriamiento **once-through** o el enfriamiento **evaporativo** o por torre húmeda. Si el enfriamiento se hace en ausencia de agua, se considera enfriamiento **seco**.

El enfriamiento **once-through** consiste en la condensación del vapor que sale la turbina (*Exhaust Steam*) mediante su intercambio de calor con agua del mar fría. Tras producirse el intercambio, el agua del mar caliente es devuelta al medio ambiente (véase Figura 3.29).



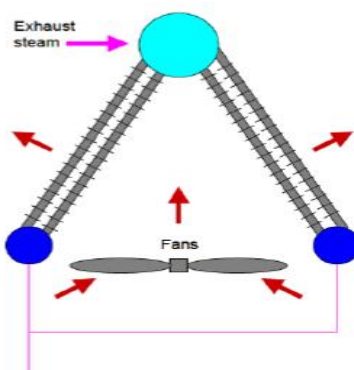
**Figura 3.29.** Esquema de un sistema de refrigeración mediante once-through. Fuente: [30]

El otro enfriamiento húmedo es el enfriamiento evaporativo o por torre húmeda. Este sistema se basa en la condensación del vapor del ciclo mediante su intercambio de calor con agua no salada que circula por una torre de refrigeración. Este agua se encuentra continuamente absorbiendo el calor del ciclo (calentándose) y condensándose en el interior de la torre (enfriándose) por medio del contacto con el aire que entra en la torre. Esta corriente de aire entra en la torre con la humedad ambiente y sale de esta en estado saturado, como consecuencia del contacto con el agua (véase Figura 3.30).



**Figura 3.30.** Esquema de un sistema de refrigeración mediante torre húmeda. Fuente: [30]

Finalmente, el enfriamiento seco consiste en la condensación del vapor del ciclo mediante su intercambio de calor con un fluido (aire), que se encuentra a menor temperatura que dicho vapor. Es común que este tipo de sistemas utilicen ventiladores o *Fans* para impulsar el aire y mejorar así la convección (véase Figura 3.31).



**Figura 3.31.** Esquema de un sistema de refrigeración mediante aire  
.Fuente: [30]

### ➤ COMPARATIVA Y SELECCIÓN DEL MÉTODO DE REFRIGERACIÓN MAS ADECUADO PARA UNA PLANTA CSP+D

Para la simulación de la planta CSP+D, es necesario escoger el sistema de refrigeración más adecuado. Como se comentó en el *Capítulo 1*, el sistema de refrigeración de una planta CSP comprende el consumo de agua más abundante de esta, por lo que es importante seleccionar la tecnología de refrigeración que más se adecue al contexto socio-económico de escasez de agua y problemática energética, además de ser solidaria a trabajar junto a una planta de desalinización.

La tecnología *once-through* requiere de grandes consumos de agua, generalmente en cantidades del orden de 90.000-100.000 m<sup>3</sup>/MWh. Esta tecnología tiene un gran inconveniente, la enorme disipación energética al medio ambiente que contribuye al calentamiento global y cambio climático. [34]

La refrigeración por torre húmeda también requiere de continuos y elevados gastos de agua dulce. Su principal ventaja con respecto a la tecnología *once-through* es que la necesidad de agua es mucho menor (en torno a 3.02 m<sup>3</sup>/MWh) y por tanto, el impacto medio ambiental es inferior también. Este sistema de refrigeración es el más utilizado para el enfriamiento de centrales termosolares, de cogeneración y de ciclo-combinado. [5]

Finalmente, la tecnología de enfriamiento *seco* parece ser una buena alternativa para las plantas CSP, si bien es cierto que las zonas geográficas con mayor escasez de agua son las más adecuadas para la implantación de estas centrales. Con este sistema, el consumo acuático en la planta CSP es de tan solo 0.30-0.34 m<sup>3</sup>/MWh [33]. Los mayores inconvenientes de este tipo de centrales son la enorme reducción de generación eléctrica, derivada del uso de ventiladores para impulsar el aire, y los elevados costes de inversión que conlleva.



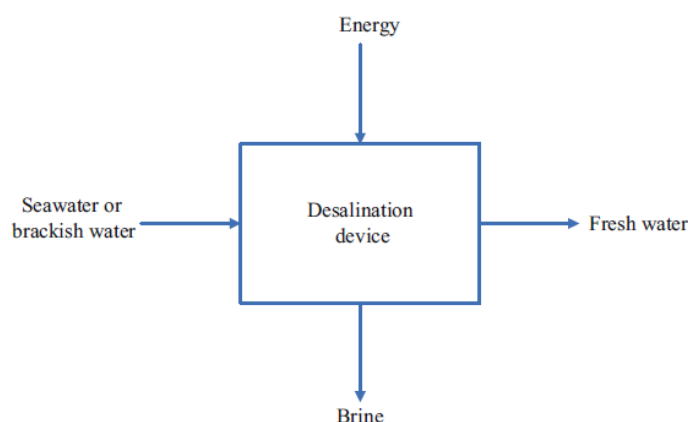
En función de la comparativa realizada, debe seleccionarse para la futura planta CSP+D aquel método de refrigeración que no tenga un elevado consumo de agua, pero que tampoco afecte significativamente a la eficiencia de producción eléctrica de la planta. La mejor opción es el enfriamiento evaporativo o por torre húmeda. Esta conclusión está avalada por numerosos autores (Palenzuela et al. 2013 [25]; 2015 [24]) y (Blanco-Marigorta et al. 2011 [2]), quienes realizaron diferentes ensayos comparando los diferentes sistemas y concluyeron que el enfriamiento evaporativo es el método más económico en términos de producción eléctrica, además de ser el más adecuado para las condiciones de presión con las que trabajan las plantas CSP instaladas en el área Mediterránea. El principal inconveniente de este sistema es el considerable consumo de agua. A pesar de ello, no hay que olvidar que se trata de una planta CSP+D en el que la instauración de una desalinizadora reducirá en gran medida los gastos de agua necesarios para dicha refrigeración.

# CAPÍTULO 4

## DESALINIZACIÓN POR EVAPORACIÓN DE MÚLTIPLE EFECTO

### 4.1 INTRODUCCIÓN

La desalinización es un proceso que consiste en la separación de un flujo de agua salada (agua del mar (en inglés *seawater*) o agua salobre (*brackish water*)) en dos partes: el destilado (*Fresh water*), libre de sales o con un bajo contenido en ellas, y la salmuera (*Brine*), disolución con una alta concentración de estas. Se trata de un proceso endotérmico, por lo que requiere de una gran cantidad de energía (véase Figura 4.1).



*Figura 4.1.* Proceso de desalinización. Fuente: [23]

En este capítulo se analizan los diferentes tipos de procesos de desalinización y se selecciona justificadamente el más adecuado para el caso estudio presentado en este trabajo. Se incluye además el funcionamiento, anatomía y diferentes configuraciones del sistema seleccionado. También aparece escrito en este capítulo un modelo matemático para el cálculo de la planta desalinizadora escogida. Finalmente, un estudio económico de los procesos de desalinización cierra el capítulo dejando paso al análisis económico presente en la siguiente sección.

### 4.2 CLASIFICACIÓN DE LOS PROCESOS DE DESALINIZACIÓN

Existen dos tipos de procesos de desalinización, los procesos térmicos y los procesos de membrana. Los procesos térmicos incluyen la destilación súbita por efecto flash multietapa o *Multistage flash* (MSF), la destilación multiefecto (MED) y la compresión mecánica de vapor (MVC). Por otro lado, los procesos de membrana se subdividen en

osmosis (u ósmosis) inversa (RO) y electrodiálisis, reservada esta última para aguas salobres.

Los procesos de desalinización pueden clasificarse también según el tipo de energía utilizada en el proceso (**Tabla 4.1**) o por el tipo de proceso físico.

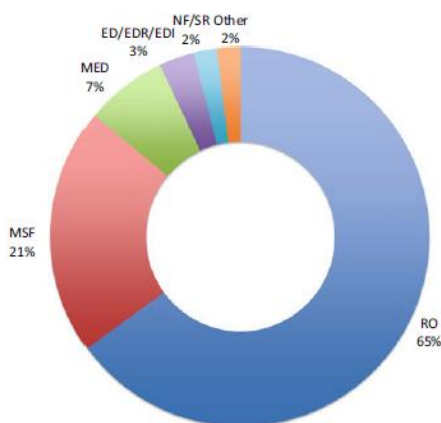
**Tabla 4.1.** Clasificación de los procesos de desalinización (según referencia [35])

Energía Empleada	Proceso	Método
Térmica	Evaporación	Destilación flash multietapa (MSF)
		Destilación multiefecto (MED)
		Termo-compresión de vapor (TVC)
		Destilación solar
Mecánica	Cristalización	Congelación
		Formación de hidratos
	Filtración y evaporación	Destilación con membranas
Eléctrica	Evaporación	Compresión mecánica vapor (MVC)
	Filtración	Ósmosis Inversa (RO)
Eléctrica	Filtración selectiva	Electrodiálisis (ED)
Química	Intercambio	Intercambio iónico(IE)

La eficiencia de estos procesos se define a través de dos parámetros: el consumo específico eléctrico (en inglés *Specific electric consumption* SEC) y por el ratio de actuación (*Performance Ratio* PR)

Este último es un parámetro adimensional definido como la relación entre el flujo de destilado producido (agua desalada) y el flujo de vapor aportado como fuente de energía, es decir, lo que se saca de la planta frente a lo que esta requiere. Cuanto mayor sea este parámetro, mayor será el rendimiento del proceso.

En la Figura 4.2 se muestra la capacidad instalada de los diferentes procesos de desalinización en el mundo.



**Figura 4.2.** Capacidad instalada de los diferentes procesos de desalinización en el mundo, 2014. Fuente: [23]

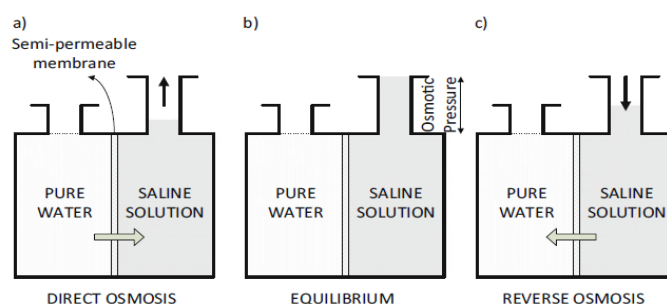
Según la figura anterior, de todas las tecnologías existentes, las más comunes y con mayor capacidad instalada mundialmente son: ósmosis inversa (65%), destilación flash multietapa (21%) y destilación multiefecto (7%).

A continuación se analizan estos procesos.

#### 4.2.1 OSMOSIS INVERSA

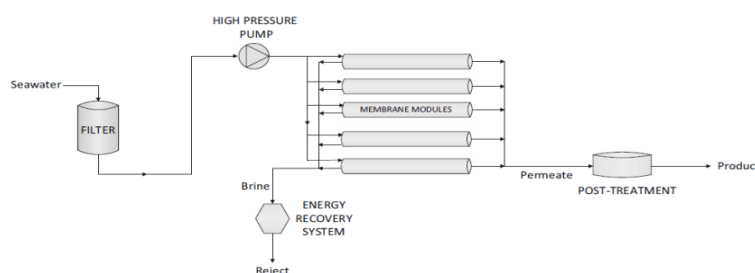
Para poder comprender el proceso de ósmosis inversa, es necesario definir primero que es la ósmosis. La ósmosis u ósmosis es una forma de difusión que ocurre cuando dos soluciones de diferentes concentraciones salinas son separadas por una membrana semipermeable. Al producirse esto, se produce la difusión de líquido de la solución menos concentrada (agua dulce) a la más concentrada (agua salada). Por tanto el nivel de agua salada aumenta hasta que se alcanza lo que se conoce como **equilibrio osmótico**, en el cual la diferencia de nivel de agua representa al valor de la presión osmótica de la solución salina.

Si se aplica una presión externa (superior a la presión osmótica) a la solución más concentrada en sales, ocurre un fenómeno físico conocido como ósmosis inversa (RO). En este caso, el flujo de agua desalada va desde la solución salina a la solución pura, separando así el agua dulce por un lado y la salmuera por otro (véase Figura 4.3).



**Figura 4.3.** Diagramas del proceso de ósmosis (izquierda), equilibrio osmótico (centro) y ósmosis inversa (derecha). Fuente: [23]

En un proceso de ósmosis inversa industrial, una bomba de alta presión es utilizada para dar energía al proceso (como la mostrada en la Figura 4.4). Cuanto mayor sea el contenido salino del agua del mar, mayor es la presión requerida por esta.



**Figura 4.4.** Esquema representativo de una planta de ósmosis inversa. Fuente: [23]

La ventaja de la osmosis inversa con respecto a otros medios de desalinización es que este tipo de procesos se abastece con energía eléctrica exclusivamente.

La vida de las membranas abarca desde 3 a 5 años. Estas membranas son muy sensibles al PH, oxidación, componentes orgánicos (bacterias, plantas, algas) e inorgánicos (incrustaciones de sales o *scaling*). Para evitar esto, los procesos de osmosis inversa requieren de pretratamientos al agua que sean capaces de prolongar la vida de la membrana y en consecuencia, de la planta.



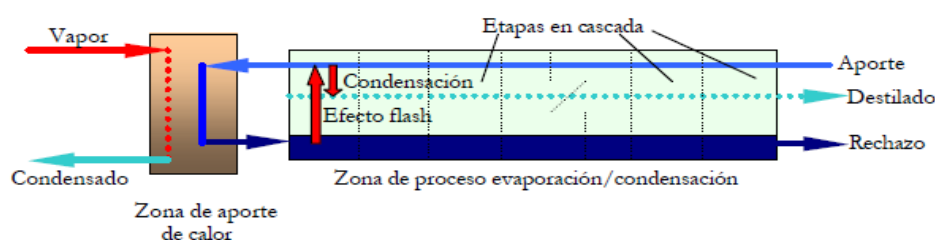
**Figura 4.5.** Fotografía de una planta de osmosis inversa.  
Fuente: <http://www.anilnco.com>

#### 4.2.2 DESTILACIÓN SÚBITA POR EFECTO FLASH MULTITAPA (MSF)

La evaporación o destilación flash multitapa (Multi Stage Flash Distillation MSF), consiste en la evaporación del agua del mar o salmuera haciendo pasar a estas por unas cámaras, llamadas etapas, que se encuentran a una presión inferior que la presión de saturación del agua salada. Como consecuencia de este fenómeno, se produce una evaporación *flash* que ocurre de forma violenta e instantánea.

Previo a su introducción en las etapas, el agua del mar o salmuera es calentada por un flujo de calor externo o **vapor motriz** (véase Figura 4.6).

Las presiones y temperaturas van disminuyendo conforme se avanza en las etapas.



**Figura 4.6.** Esquema de una planta de destilación por efecto flash multitapa MSF. Fuente: [35]

La destilación por efecto flash es especialmente utilizada para aguas de mala calidad, que incluyen alta salinidad, contaminación y temperatura.

El gran inconveniente de este tipo de plantas es su consumo energético, que es muy elevado. Dentro de este consumo se incluyen el consumo térmico (zona de aporte de calor del vapor motriz) y el consumo eléctrico (uso de bombas para circulación de flujos por la planta).

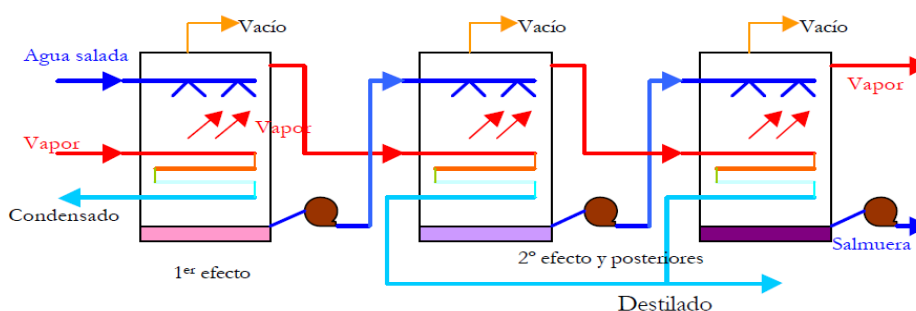


**Figura 4.7.** Planta MSF en la estación de Jebel Ali G, Dubai.  
Fuente: <https://en.wikipedia.org>

#### 4.2.3 DESTILACIÓN MULTIEFECTO (MED)

El proceso de destilación por múltiple efecto (MED) consiste en la evaporación del agua del mar como consecuencia del calor absorbido por este en un intercambiador de calor. Dicha energía térmica procede del calor latente de la condensación del vapor motriz cedido al agua salina. Este vapor motriz procede de una fuente de calor externa como puede ser una caldera o el vapor de salida de una turbina en una central de producción de vapor.

El proceso se subdivide, al igual que en la destilación flash, en sucesivas etapas, conocidas como efectos. En cada efecto, el agua del mar se evapora, separando el destilado de la salmuera (véase Figura 4.8). Al igual que en el proceso MSF, las temperaturas y presiones van disminuyendo conforme se avanza en las etapas.



**Figura 4.8.** Esquema de una planta de desalinización por múltiple efecto MED. Fuente: [35]

Al final del proceso, toda la salmuera recogida se devuelve al mar, y el destilado es almacenado y empleado para los usos que sean necesarios.



**Figura 4.9.** Planta de destilación por múltiple efecto. Fuente: <http://www.cnsihai.com/>

### **4.3 SELECCIÓN DEL PROCESO DE DESALINIZACIÓN MÁS ADECUADO**

La tecnología desalinizadora seleccionada para su acoplo a la central termosolar de concentración en el proyecto es la tecnología de destilación por múltiple efecto MED, debido a las ventajas que posee sobre los otros dos métodos:

- Bajo consumo específico eléctrico comparado con los otros procesos ( $1.3-1.5 \text{ kWh/m}^3$ )
- Elevado PR (Performance Ratio)
- Operación a bajas temperaturas ( $<70^\circ\text{C}$ )
- No tiene necesidad de pretratamientos de agua (caso ósmosis) y posee alta tolerancia a variaciones en las condiciones del agua del mar de alimentación
- Alta confiabilidad
- Simplicidad de operación
- Bajos costes de operación en comparación con otros procesos
- Operación continua con mínima supervisión
- Adaptación a cualquier fuente de calor externa
- Altas eficiencias térmicas y ahorros en costes de combustible
- **Ideal para su acoplo con plantas de producción de potencia (alimentación con vapor a tan sólo 0.35 bar)**



Una vez seleccionada la tecnología, es importante entrar en profundidad en sus características y funcionamiento.

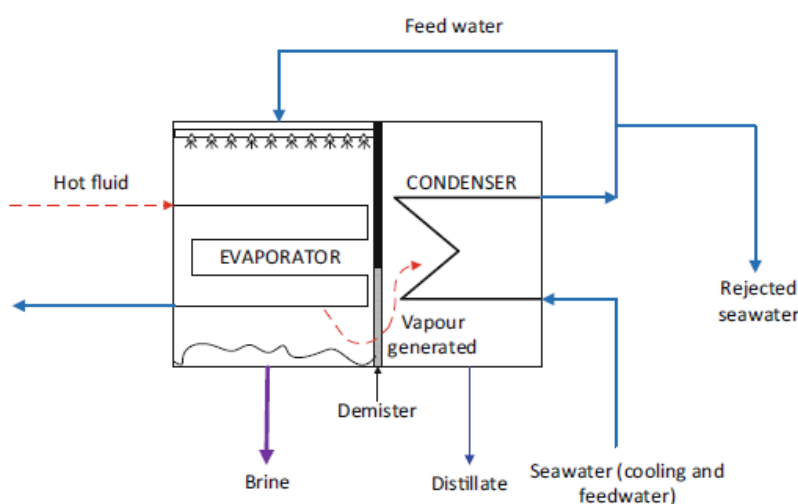
## **4.4 PROCESO DE DESTILACIÓN POR MÚLTIPLE EFECTO (MED)**

### **4.4.1 ANATOMÍA Y FUNCIONAMIENTO**

Para entender mejor el proceso de destilación multiefecto (en inglés *Multi-effect Distillation*), es necesario en primer lugar entender lo que ocurre en una sola cámara o efecto. Esto es un proceso de destilación de simple efecto.

Los principales componentes de este tipo de sistema son el **evaporador** y el **condensador o precalentador**.

El evaporador es el componente en el que la fuente de calor externa (energía de alimentación) transfiere su energía térmica al proceso. La fuente de calor puede ser un líquido o un vapor, procedente de un ciclo de potencia o de una caldera. Este fluido caliente (*hot fluid*) transfiere su energía al agua de alimentación (*feedwater*) que, como se observa en la Figura 4.10, es pulverizada sobre el haz de tubos del evaporador, formándose así una delgada capa de agua sobre estos y haciendo eficaz la transferencia de calor.



**Figura 4.10.** Diagrama de un proceso de destilación de simple efecto. Fuente: [23]

El agua del mar se calienta hasta su punto de ebullición, evaporándose parcialmente (la parte no evaporada forma la salmuera o *brine*). El vapor generado, que se encuentra libre de sales es conducido hasta el condensador o precalentador, y allí se

transforma a estado líquido (condensa) al enfriarse por el agua del mar que circula por el interior de los tubos del condensador. De esa manera, se obtiene el destilado.

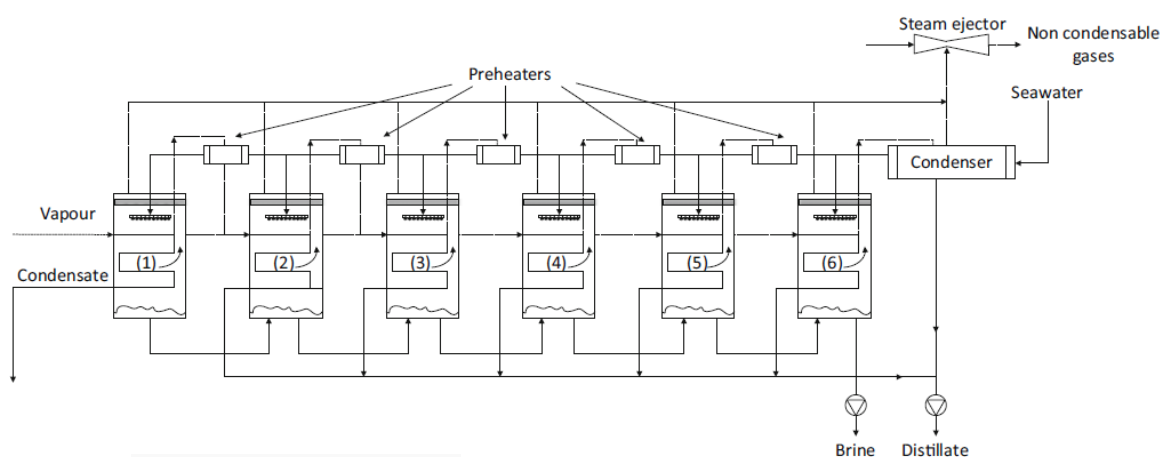
El proceso de conducción del vapor generado hacia la cámara del condensador se realiza por medio de un desnebulizador o eliminador de niebla (*demister*), un elemento que impide la mezcla de la salmuera con el vapor o con el destilado, además de evitar que la salmuera llegue a incrustarse en los tubos del condensador, lo que provocaría importantes pérdidas de transferencia de calor.

En la condensación del vapor, se cede calor a los tubos del condensador, precalentándose el flujo de agua salada que circula por el interior de los mismos.

El destilado (correspondiente al vapor condensado) y la salmuera generada (agua salada no evaporada, con una concentración en sales mayor que la del flujo de entrada) son los productos finales de este proceso.

Como se puede observar en la misma figura, el flujo de agua salada que ha sido precalentada en el condensador, es dividido en dos corrientes, la corriente de alimentación (*feedwater*), la cual será rociada sobre los tubos del evaporador, y la corriente de agua rechazada (*Rejected water*), cuya misión es eliminar el exceso de calor añadido al sistema en el evaporador. Esto quiere decir que el evaporador no consume todo el calor que le suministra la fuente, y el sobrante debe ser evacuado, devolviéndose al mar.

El problema de utilizar una única cámara es la baja eficiencia del proceso. El PR es muy bajo. Para mejorar esto, se añaden más efectos, generando un sistema de cámaras en serie constituyendo el sistema de estudio (véase Figura 4.11), una planta de destilación de múltiple efecto (en inglés *Multi-effect distillation plant MED*).



**Figura 4.11.** Proceso de destilación multiefecto. Fuente: [23]

En este tipo de plantas, solo es necesaria una fuente de calor externa, que alimenta a la primera cámara. Para el resto de cámaras, se utiliza como fuente de calor el vapor generado en la cámara anterior.

Una propiedad muy importante de este sistema es que cada efecto se encuentra a una presión y temperatura inferior a la del efecto anterior. En todo el sistema se producen varios procesos de condensación y evaporación, a temperaturas cada vez más pequeñas conforme se avanzan los efectos (y a sus presiones de saturación correspondientes). El destilado total de la planta será la suma de los destilados obtenidos en cada efecto.

El último efecto es algo particular, ya que su condensación se realiza en el condensador final o precalentador. Este elemento consiste en un intercambiador de calor por el que circula el vapor sin sales que sale del último efecto y el agua del mar que entra al sistema. Con esto se consigue un precalentamiento del agua del mar, antes de ser pulverizado sobre los efectos, tal y como ocurría en el esquema del evaporador de simple efecto.

Es posible optimizar el proceso realizando evaporaciones flash al flujo de destilado y al flujo de salmuera, aprovechando que las temperaturas y presiones de los efectos previos son superiores a los efectos siguientes. Además, tal y como se observa en la Figura 4.11, existen precalentadores para cada efecto. Estos elementos aseguran que el agua de alimentación entra en cada efecto a la temperatura adecuada.

#### **4.4.2 LIMITACIONES DE LAS PLANTAS MED (SISTEMAS LT-MED)**

La utilización de agua marina puede desembocar en problemas de *scaling* o incrustaciones y problemas de corrosión en las tuberías. El *scaling* es la acumulación de sales inorgánicas como carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) o hidróxido de magnesio ( $\text{Mg(OH)}_2$ ) en la superficie externa de los haces de tubos que conforman los efectos. La solubilidad de estas sales disminuye con el aumento de temperatura, por lo que cuanto menor sea la temperatura menos problemas existirán. Por ello, los sistemas MED tienen limitada la temperatura de trabajo a un máximo de 70 °C. A estas plantas se las conoce como LT-MED (Low Temperature MED) o plantas de baja temperatura. Es imprescindible controlar que la temperatura de la fuente de calor externa (la que alimenta la planta), al ser la mayor temperatura del sistema, no sobrepase ese valor. [17]

#### **4.4.3 CLASIFICACIÓN Y SELECCIÓN DE LOS SISTEMAS MED**

Los sistemas de múltiple efecto pueden ser clasificados de acuerdo a la disposición de los tubos en los efectos, a la dirección del flujo de agua de mar o al diseño de los propios efectos.

A continuación se analizan las diferentes configuraciones posibles, además de seleccionar las más apropiadas para este proyecto CSP+D.

##### **1. Clasificación según disposición de tubos en evaporador**

Los evaporadores pueden contener:

- Haces de tubos sumergidos
- Tubos verticales con película ascendente (VTE) o descendente (VTEs)
- Tubos horizontales con película ascendente (HTE) o descendente (HTEs)
- Intercambiadores de placas

Los evaporadores sumergidos están formados por tubos introducidos en agua de mar por los que circula el vapor caliente en su interior. Las primeras plantas MED comerciales usaban este tipo de sistema. El problema de esta configuración es su baja transferencia de calor y su alta probabilidad de formación de cal.

Esto no ocurre en las configuraciones que permiten mantener una delgada capa de película líquida sobre la superficie de intercambio. En los sistemas VTE, la salmuera es evaporada en el interior de los tubos y el vapor de destilado es condensado fuera. Por el contrario, en los sistemas HTE, la salmuera es evaporada en el exterior de los tubos y el vapor condensa dentro de estos.

La última opción es el uso de intercambiadores de placas de titanio. Se trata de un conjunto de placas corrugadas desarrolladas especialmente para desalinización. El flujo de vapor y el de salmuera circulan en contracorriente de manera intermitente por los espacios entre placas. Con este método se consigue un elevado coeficiente de transferencia de calor.

##### **❖ Selección:**

La configuración a considerar para este proyecto es la de haz de tubos horizontales (HTE). Las ventajas de este sistema son:

- Eficiente distribución de agua y mojado de tubos
- Altos coeficientes de transferencia de calor (intercambio de calor en ambos lados del tubo)
- Ausencia de partes secas

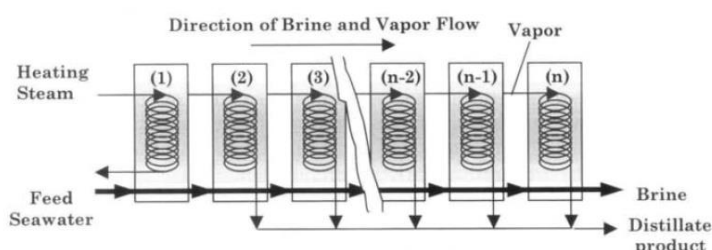
- Baja formación de escalados y dañado de tubos
- Retirada eficiente de vapores y gases no-condensables
- Simples condiciones de operación y mantenimiento
- Alta experiencia comercial y madurez

## 2. Clasificación según dirección del flujo del agua

Según la dirección del flujo de agua del mar, las plantas MED pueden clasificarse como:

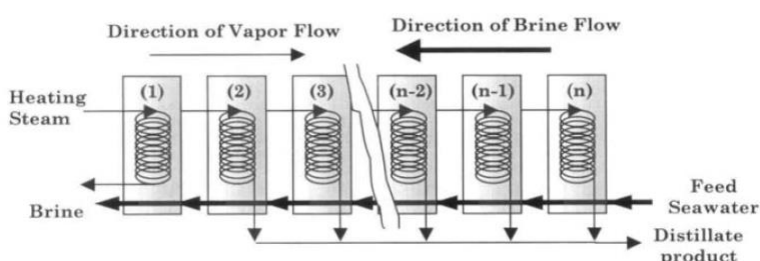
- Plantas de alimentación hacia delante (en inglés *Forward Feed FF* )
- Plantas de alimentación hacia atrás (en inglés *Backward Feed BF* )
- Plantas de alimentación en paralelo (en inglés *Paralell Feed PF* )

**A.)** En las plantas de alimentación hacia delante, tanto el flujo de agua del mar de alimentación y salmuera como el flujo de destilado fluyen en la misma dirección. El agua de alimentación entra por el primer efecto (que posee la mayor temperatura y presión) y va circulando por los demás efectos hasta llegar al condensador final (véase Figura 4.12).



**Figura 4.12.** Proceso de destilación multiefecto *Forward Feed*. Fuente: [7]

**B.)** En las plantas de alimentación hacia atrás, la alimentación del agua del mar y salmuera van en sentido opuesto al flujo de destilado. El agua del mar se introduce en el último efecto (de menor temperatura y presión) y recorre la planta hasta llegar al primer efecto. El destilado sin embargo, circula hacia el último efecto (véase Figura 4.13).



**Figura 4.13.** Proceso de destilación multiefecto *Backward Feed*. Fuente: [7]

El problema de esta configuración es que la mayor concentración de salmuera se encuentra en el primer efecto que, al ser el de mayor temperatura (intercambio con calor de alimentación), se incrementa el riesgo de formación de escalados (la solubilidad de sales disminuye con el aumento de temperatura). Otra desventaja es que el agua del mar va entrando a efectos de cada vez mayor presión, lo que se traduce en necesidad de bombas y por tanto, altos costes de bombeo y mantenimiento (riesgo de fugas en conexiones de la bomba). Estas desventajas hacen que esta configuración no sea la más adecuada para desalinización industrial.

- C.) Por último, las plantas alimentación paralela son aquellas configuraciones en las que la distribución de alimentación de agua salada es dividida y distribuida de manera uniforme en cada efecto. En cada uno de ellos, el agua del mar de alimentación es calentada hasta la temperatura de saturación del efecto correspondiente, obteniéndose en cada cámara los correspondientes flujos de destilado (véase Figura 4.14).

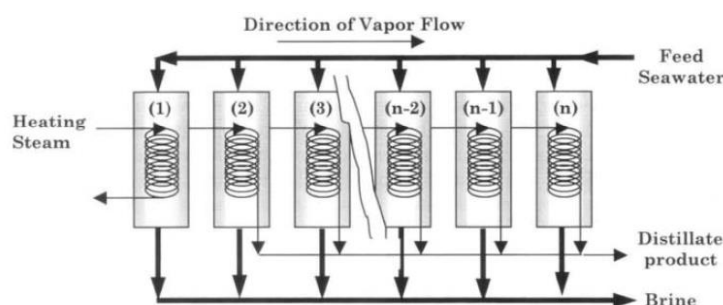


Figura 4.14. Proceso de destilación multiefecto *Paralell Feed*. Fuente: [7]

La ventaja de este tipo de sistemas reside en su simplicidad de diseño.

#### ❖ Selección:

En cuanto al tipo de configuración seleccionada, tras analizar la configuración *Backward Feed* y sus inconvenientes, queda esta descartada para el análisis del proyecto. Las opciones *Forward Feed* y *Paralell Feed* parecen las más apropiadas para CSP+D.

Como expresa Nafey et al. (2006) [21] en su análisis termo-económico de la comparación entre la configuración *Forward Feed* y *Paralell Feed*, se concluye que:

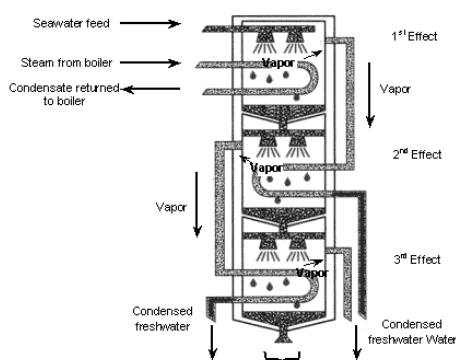
- *Performance Ratio* PR en *Forward Feed* es un 42 % mayor que en la configuración *Paralell Feed*
- Eficiencia energética de FF es un 17 % más alta que en PF
- Consumo de agua para alimentación hacia delante un 40% menor que en alimentación en paralelo

Además del considerado estudio, muchas plantas comerciales utilizan FF puesto que en él, la menor concentración de salmuera tiene lugar en el efecto de mayor temperatura (primer efecto), y en consecuencia, la mayor concentración tiene lugar en el efecto de menor temperatura (último efecto). Esta disposición evita la producción de costras calcáreas.

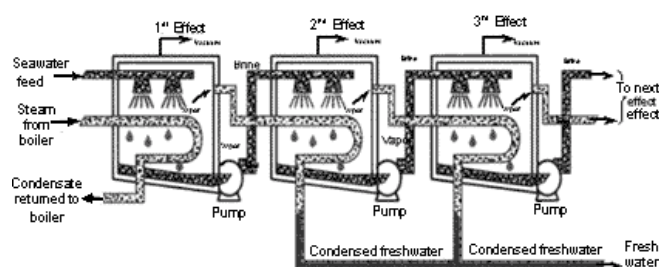
Por todos los motivos anteriormente expuestos, se ha escogido la configuración de alimentación hacia delante o *Forward Feed* FF.

### 3. Clasificación según la disposición de los efectos

La disposición de los efectos de las plantas MED puede ser en vertical (Figura 4.15) o en horizontal (Figura 4.16). Las capacidades más altas son logradas con disposición horizontal puesto que poseen una alta estabilidad, facilidad de operación y mantenimiento. Las plantas verticales admiten menores capacidades.



**Figura 4.15.** Disposición de efectos vertical.  
Fuente: Dabbagh et al. (1994)



**Figura 4.16.** Disposición de efectos horizontal.  
Fuente: Dabbagh et al. (1994)



**❖ Selección:**

Se ha seleccionado por tanto, la disposición de efectos horizontal.

En conclusión, la planta MED seleccionada para el estudio, cuya anatomía, modelizado y funcionamiento configuran este trabajo es:

**Planta de destilación por múltiple efecto a baja temperatura (LT-MED) con haz de tubos horizontales, alimentación hacia delante (*Forward Feed*) y disposición horizontal de efectos.**

**4.4.4 MODELIZACIÓN DEL SISTEMA MED SELECCIONADO**

Para la modelización del sistema MED se ha usado un modelo desarrollado por El-Dessouky and Ettouney (2002) [7]. Se trata de un modelo simplificado que mantiene los procesos fundamentales de la planta desalinizadora y que permitirá obtener:

- Flujos de salmuera y destilado
- Concentraciones de salmuera
- Temperaturas
- Áreas de transferencia de calor

**Hipótesis del modelo:**

- No existen ni cajas flash ni precalentadores
- Pérdidas termodinámicas constantes en todos los efectos
- Áreas de transferencia de calor constantes en todos los efectos
- No existen evaporaciones flash en el interior de los efectos
- El agua del mar que entra en el primer efecto se encuentra a la temperatura de saturación del mismo
- Mismos flujos de calor intercambiado en todos los efectos
- Los vapores formados están completamente libres de sales
- El calor intercambiado en cada efecto es proporcional a la diferencia entre la temperatura de condensación y evaporación del mismo
- No existen pérdidas de calor al exterior ( Procesos Adiabáticos)

### Parámetros utilizados en el modelo:

Para un determinado “n” (número de efectos)

- **Flujos de Salmuera ( $B_1, B_2, \dots, B_{n-1}, B_n$ )** **(n desconocidos)**
  - **Concentración de Salmuera, ( $X_1, X_2, \dots, X_{n-1}$ )** **(n-1 desconocidos)**
  - **Flujos de agua destilada ( $D_1, D_2, \dots, D_{n-1}, D_n$ )** **(n desconocidos)**
  - **Temperatura vapores formados en cada efecto ( $T_1, T_2, \dots, T_{n-1}$ )** **(n-1 desconocidos)**
  - **Flujo de vapor** **(1 desconocido)**
  - **Área de transferencia de calor (A)** **(1 desconocido)**
- TOTAL: (4·n) desconocidos**

Por tanto, un total de  $4 \times n$  ecuaciones se utilizan para obtener los valores de los flujos, concentración y temperatura de todos los efectos, así como el área de transferencia de calor.

### Inputs del modelo:

Los siguientes parámetros son necesarios y definidos al comienzo de la modelización:

- **Temperatura del vapor del ciclo (Motive Steam)**  **$T_s$**
- **Temperatura del vapor en el último efecto**  **$T_n$**
- **Concentración de salmuera a la salida de la planta MED**  **$X_n$**
- **Concentración de salmuera a la entrada de la planta MED**  **$X_f$**
- **Gasto másico de destilado**  **$M_d$**

### Diagrama del modelo:

En la Figura 4.17 se muestra un diagrama de la planta MED seleccionada conforme al apartado 4.3.3 de este proyecto. En él aparecen representados todos los flujos de la planta con sus respectivas propiedades en los diferentes puntos del sistema. Mediante esta figura, se presenta una mayor facilidad para el seguimiento y entendimiento del modelo.

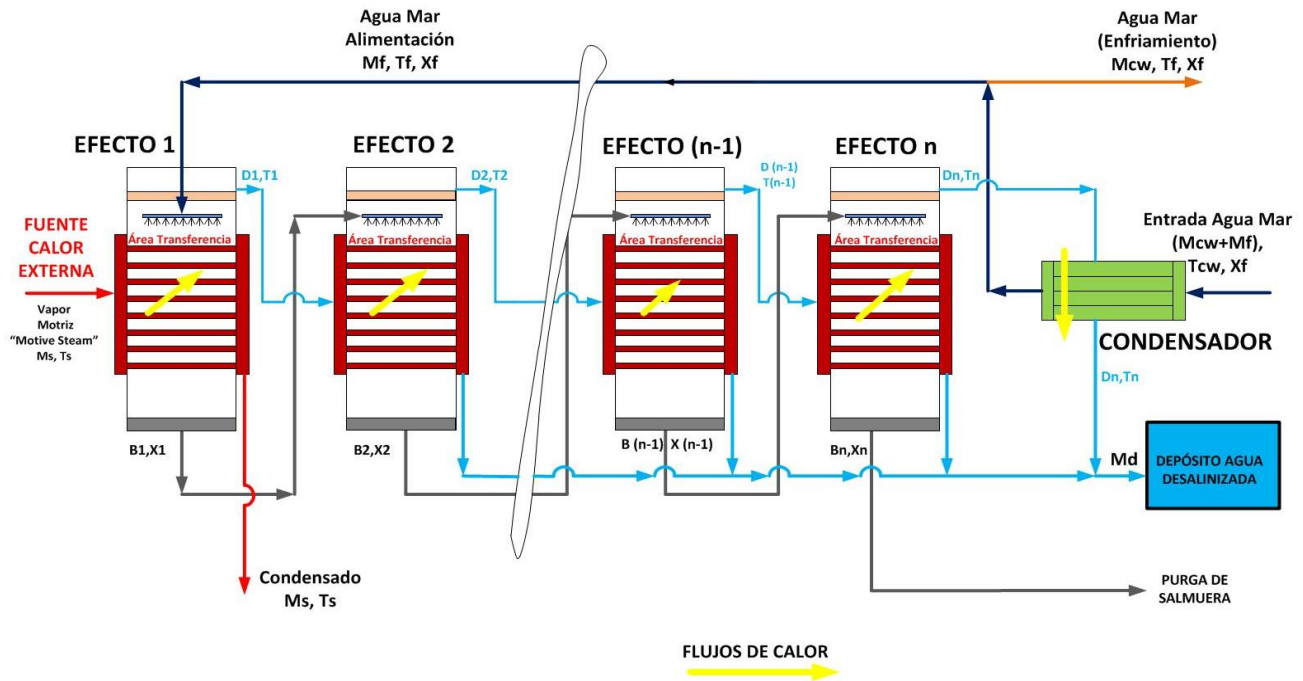


Figura 4.17. Diagrama de planta MED seleccionada (incluye parámetros del modelo)

### Ecuaciones del modelo:

#### 1. Balance general

Realizando un balance general de masa y sales a la planta MED, podemos determinar el flujo de salmuera que sale del último efecto  $B_n$  y el flujo de agua del mar de alimentación del primer efecto  $M_f$ .

$$M_f = M_d + B_n \quad (1)$$

$$X_f \cdot M_f = X_n \cdot B_n \quad (2)$$

La ecuación (2) establece que la cantidad de sales a la entrada de la planta es la misma que a la salida, si bien es cierto que las concentraciones varían.

Mediante las ecuaciones (1) y (2) obtenemos que

$$B_n = \left( \frac{X_f}{X_n - X_f} \right) \cdot M_d \quad (3)$$

Una vez determinado el valor del flujo de salmuera extraído, podemos obtener el flujo de agua de mar introducido en la planta  $Mf$  mediante (1).

## 2. Perfil de Temperatura

Utilizando la hipótesis de flujos de calor constantes en todos los efectos, obtenemos que

$$Q_1 = Q_2 = \dots = Q_{n-1} = Q_n \quad (4)$$

Con:

$$Q_1 = M_s \cdot \lambda_s \text{ para primer efecto} \quad (5)$$

$$Q_2 = D_i \cdot \lambda v_i \text{ para efectos 2 a } n \quad (6)$$

donde  $Q$  es el calor intercambiado,  $M_s$  es el flujo másico de la fuente de calor externa (Motive Steam),  $D_i$  es el flujo de destilado en el efecto “i”,  $\lambda v_i$  es el calor latente de los vapores formados a las temperaturas  $(T_i - \Delta T_{loss})$ . Los subíndices  $i$ ,  $s$  y  $v$  se refieren al efecto, al flujo de calor externo y al vapor sin sales formado en cada efecto respectivamente.

Ecuación general de transferencia de calor:

$$Q_i = A_i \cdot U_i \cdot \Delta T_i \quad (7)$$

donde  $A_i$  es el área de transferencia del efecto  $i$ ,  $\Delta T_i$  es el incremento de temperatura en el efecto  $i$  y  $U_i$  es el coeficiente global de transferencia de calor en el efecto  $i$ .

Como el área de transferencia de calor y el flujo de calor es constante en todos los efectos, utilizando la ecuación (7):

$$\frac{Q_1}{A_1} = \frac{Q_2}{A_2} = \dots = \frac{Q_{n-1}}{A_{n-1}} = \frac{Q_n}{A_n} \quad (8)$$

De las ecuaciones (7) y (8) obtenemos que

$$U_1 \cdot \Delta T_1 = U_2 \cdot \Delta T_2 = \dots = U_{n-1} \cdot \Delta T_{n-1} = U_n \cdot \Delta T_n \quad (9)$$

La caída de temperatura total ( $\Delta T_t$ ) en toda la planta MED se define como

$$\Delta T_t = T_s - T_n \quad (10)$$

Donde  $T_s$  y  $T_n$  son las temperaturas del “Motive Steam” y del vapor destilado formado en el último efecto  $n$ , respectivamente. También se puede expresar este incremento de temperatura como la suma de los sucesivos incrementos de temperatura producidos en cada efecto:

$$\Delta T_t = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \dots + \Delta T_{n-1} + \Delta T_n \quad (11)$$

A partir de la ecuación de (9) se obtiene que:

$$\Delta T_2 = \Delta T_1 \cdot \frac{U_1}{U_2} \quad (12)$$

$$\Delta T_3 = \Delta T_2 \cdot \frac{U_2}{U_3} \quad (13)$$

Sustituyendo (12) y (13) se obtiene que

$$\Delta T_3 = \Delta T_1 \cdot \frac{U_1}{U_3} \quad (13.1)$$

De la que se deduce la expresión general:

$$\Delta T_i = \Delta T_1 \cdot \frac{U_1}{U_i} \quad (14)$$

Introduciendo la ecuación (14) en la ecuación (11) se obtiene que:

$$\Delta T_t = \Delta T_1 \cdot U_1 \cdot \left( \frac{1}{U_1} + \frac{1}{U_2} + \dots + \frac{1}{U_{n-1}} + \frac{1}{U_n} \right) \quad (15)$$

Y de (15), finalmente:

$$\Delta T_1 = \frac{\Delta T_t}{U_1 \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{U_i}} \quad (16)$$

Si se especifican los coeficientes globales de transferencia de calor en cada efecto, se pueden hallar las caídas de temperatura que se producen en cada uno de los efectos

(14 y 16). Una vez calculadas estas diferencias de temperatura, se pueden determinar las temperaturas de los vapores no salinos producidos en cada efecto.

$$T_1 = T_s - \Delta T_1 \quad \text{para primer efecto} \quad (17)$$

$$T_i = T_{i-1} - \Delta T_1 \cdot \frac{U_1}{U_i} \quad \text{para efectos 2 a } n \quad (18)$$

### 3. Perfiles de concentración salina y flujos de destilado y salmuera

Según la Figura 4.15, y al ser los módulos de calor intercambiado constantes en todos los efectos (6), se obtiene:

$$M_d = D_1 + D_2 + \dots + D_{n-1} + D_n \quad (19)$$

$$D_i \cdot \lambda v_i = D_{i-1} \cdot \lambda v_{i-1} \quad \text{para efectos 2 a } n \quad (20)$$

La ecuación (20) se utiliza para expresar los valores de  $D_i$  (desde efecto 2 a  $n$ ) en términos de  $D_1$ , donde:

$$D_2 = D_1 \cdot \frac{\lambda v_1}{\lambda v_2} \quad (20.1)$$

$$D_3 = D_2 \cdot \frac{\lambda v_2}{\lambda v_3} = D_1 \cdot \frac{\lambda v_1}{\lambda v_3} \quad (20.2)$$

Con las anteriores ecuaciones, se obtiene la fórmula recursiva expresada como:

$$D_i = D_1 \cdot \frac{\lambda v_1}{\lambda v_i} \quad \text{para efectos 2 a } n \quad (21)$$

Sustituyendo ecuación (21) en ecuación (19):

$$M_d = D_1 + D_1 \cdot \frac{\lambda v_1}{\lambda v_2} + \dots + D_1 \cdot \frac{\lambda v_1}{\lambda v_{n-1}} + D_1 \cdot \frac{\lambda v_1}{\lambda v_n} \quad (22)$$

Se obtiene una expresión para determinar  $D_1$ :

$$D_1 = \frac{M_d}{\lambda v_1 \cdot \left( \frac{1}{\lambda v_1} + \frac{1}{\lambda v_2} + \dots + \frac{1}{\lambda v_{n-1}} + \frac{1}{\lambda v_n} \right)} \quad (23)$$

Una vez obtenido el flujo de destilado para el efecto 1, se utiliza la ecuación (21) para obtener los destilados en los sucesivos efectos (2 a n):

$$D_2 = D_1 \cdot \frac{\lambda v_1}{\lambda v_2} \quad (23.1)$$

$$D_3 = D_1 \cdot \frac{\lambda v_1}{\lambda v_3} \quad (23.2)$$

...

El flujo de salmuera se determina como:

$$B_1 = M_f - D_1 \quad \text{Para el efecto 1} \quad (24)$$

$$B_i = B_{i-1} - D_i \quad \text{Para los efectos 2 a } n \quad (25)$$

La concentración salina en las salmueras que salen de cada efecto se calcula como:

$$X_1 = X_f \cdot \frac{M_f}{B_1} \quad \text{Para el efecto 1} \quad (26)$$

$$X_i = X_{i-1} \cdot \frac{B_{i-1}}{B_i} \quad \text{Para los efectos 2 a } n \quad (27)$$

#### 4. Áreas de transferencia de Calor

Las áreas de transferencia de calor se calculan con la ecuación general de transferencia de calor (Ecuación 7) aplicada a los efectos de la planta desalinizadora

$$A_1 = \frac{D_1 \cdot \lambda v_1}{U_1 \cdot (T_s - T_1)} \quad \text{Para el efecto 1} \quad (28)$$

$$A_i = \frac{D_i \cdot \lambda v_i}{U_i \cdot (T_i - \Delta T_{loss})} \quad \text{Para los efectos 2 a } n \quad (29)$$

La existencia de las pérdidas térmicas es debida a las transiciones entre los diferentes efectos. Para este modelo, es considerado un valor constante (normalmente entre 0.5 y 3°C).

### 5. Criterio de Convergencia y nuevas iteraciones

Llegados a este punto, se revisan las áreas obtenidas y si la máxima diferencia entre ellas es superior a la tolerancia impuesta, se itera el proceso, calculando unos nuevos  $\Delta T$  en cada efecto:

Para calcular estas nuevas variaciones de temperatura, se realiza la media de las áreas obtenidas:

$$A_m = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{n} \quad (30)$$

Una vez obtenida esta área media, calculamos los nuevos  $\Delta T$  desde el primer hasta el último efecto mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta T'_i = \frac{\Delta T_i \cdot A_i}{A_m} \quad (31)$$

Entonces, se continúa el proceso con el cálculo de las nuevas temperaturas de los vapores formados en los efectos 1 a  $n$  (Ecuaciones 17 y 18). Se repiten todos los pasos del proceso hasta calcular las nuevas áreas.

El proceso de iteración termina cuando la mayor diferencia entre áreas obtenidas es inferior a la tolerancia que, al poseer un valor muy bajo, provocará que se cumpla la hipótesis impuesta de áreas de transferencia iguales.



## 6. Parámetros de actuación

El ratio de actuación (“Performance Ratio” PR) puede obtenerse de la siguiente forma:

$$PR = \frac{M_d}{M_s} \quad (32)$$

El valor del flujo de calor de la fuente externa  $M_s$  se obtiene de la hipótesis de mismos módulos de calor intercambiado (Ecuación 6). De esta manera, aplicándose en el primer efecto, se obtiene:

$$M_s = D_1 \cdot \frac{\lambda v_1}{\lambda_s} \quad (33)$$

El área específica de transferencia de calor (Área total por unidad de flujo másico de destilado) se obtiene como:

$$sA = \frac{\sum_{i=1}^n A_i + A_c}{M_d} \quad (34)$$

Donde  $A_i$  es el área de intercambio en cada efecto y  $A_c$  es el área del condensador final. Este último área se obtiene como:

$$A_c = \frac{Q_c}{U_c \cdot (LMTD)_c} \quad (36)$$

donde:

- $Q_c$  es el calor evacuado en el condensador (que se transmitirá al agua del mar que entra a la planta MED)

$$Q_c = D_n \cdot \lambda v_n \quad (37)$$

- $U_c$  es el coeficiente global de transferencia de calor perteneciente al condensador

- LMTD es la diferencia de temperaturas logarítmico media, definida como:

$$(LMTD)_c = \frac{(T_n - T_f) - (T_n - T_{cw})}{\ln\left(\frac{T_n - T_f}{T_n - T_{cw}}\right)} \quad (38)$$

Donde a su vez  $T_{cw}$  es la temperatura del agua del mar a la entrada del condensador,  $T_f$  es la temperatura del agua del mar precalentada (salida del condensador) y  $T_n$  es la temperatura de condensación del vapor formado en el último efecto, la cual se mantendrá constante durante condensación en el condensador final (cambio de fase).

En último lugar se obtiene el flujo de agua de mar rechazada para evacuar el calor que sobra de la fuente de calor externa  $M_{cw}$  (*Rejected water*). Realizando un balance sobre el condensador, se puede hallar su valor:

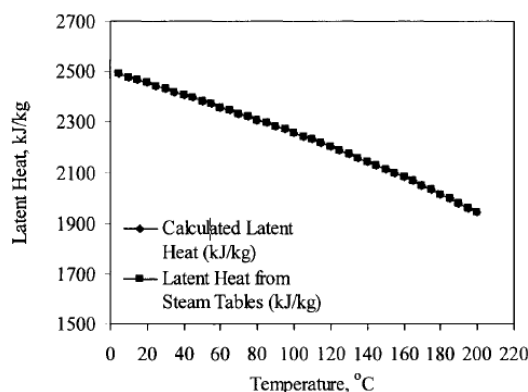
$$D_n \cdot \lambda v_n = (M_f + M_{cw}) \cdot C_{pSW} \cdot (T_f - T_{cw}) \quad (39)$$

#### ❖ CALOR LATENTE DE LOS VAPORES FORMADOS

Para el cálculo del calor latente de los vapores formados en cada efecto  $\lambda v_i$  se ha utilizado la siguiente correlación (El-Dessouky and Ettouney, 2002)). [7]

$$\lambda = 2501.897149 - 2.407064037 \cdot T + 1.192217 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 - 1.5863 \cdot 10^{-5} \cdot T^3 \quad (6.1)$$

Donde  $T$  es la temperatura de saturación en °C y  $\lambda$  es el calor latente en kJ/kg.



**Figura 4.18.** Variación del calor latente de evaporación del agua en función de la temperatura. Fuente: [7]

#### ❖ CALOR ESPECÍFICO DEL AGUA MARINA

Para el cálculo del calor específico a presión constante del agua del mar se ha empleado la siguiente correlación (El-Dessouky and Ettouney, 2002)). [7]

$$C_p = (A + B \cdot T + C \cdot T^2 + D \cdot T^3) \cdot 10^{-3} \left( \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \right)$$

$$A = 4206.8 - 6.6197 \cdot s + 1.2288 \cdot 10^{-2} \cdot s^2$$

$$B = -1.1262 + 5.4178 \cdot 10^{-2} \cdot s - 2.2719 \cdot 10^{-4} \cdot s^2$$

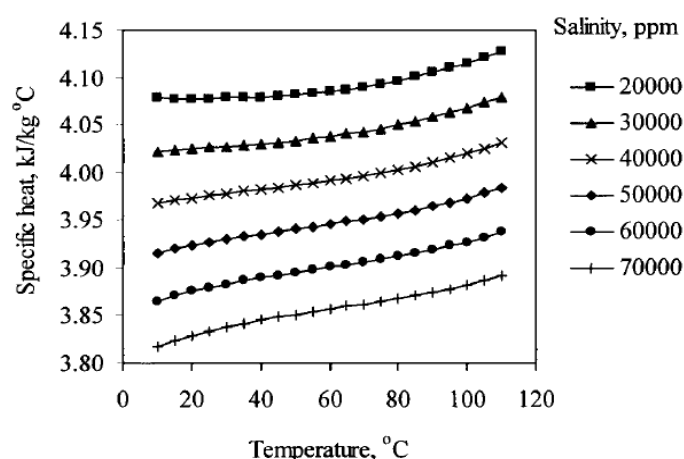
$$C = 1.2026 \cdot 10^{-2} - 5.3566 \cdot 10^{-4} \cdot s + 1.8906 \cdot 10^{-6} \cdot s^2$$

$$D = 6.8777 \cdot 10^{-7} + 1.517 \cdot 10^{-6} \cdot s - 4.4268 \cdot 10^{-9} \cdot s^2$$

donde:

$S$  es la salinidad del agua en g/kg       $20000 \text{ ppm} < s < 160000 \text{ ppm}$

$T$  la temperatura en  $^\circ\text{C}$        $20 \text{ }^\circ\text{C} < T < 180 \text{ }^\circ\text{C}$



**Figura 4.19.** Variación del calor específico del agua marina en función de temperatura y salinidad. Fuente: [7]

## **4.5 ESTUDIO ECONÓMICO DE PROCESOS DE DESALINIZACIÓN**

Es objetivo de estudio el análisis económico de la integración de la planta desalinizadora. Para ello, es importante el análisis de los parámetros y factores económicos que afectan al sistema.

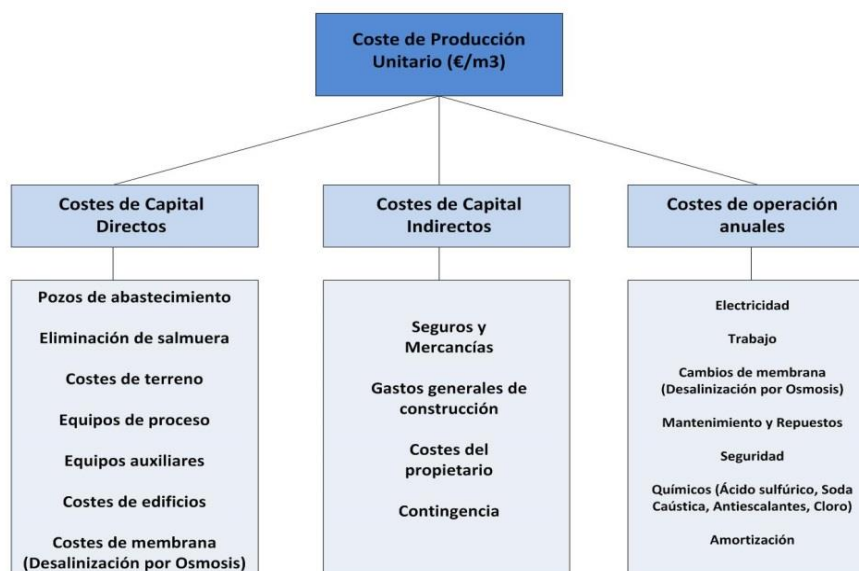
### **4.5.1 FACTORES QUE AFECTAN AL COSTE DE PRODUCCIÓN**

El coste de producción de agua dulce viene determinado por numerosas variables de diseño y operación [8], entre las que se encuentran:

- **Salinidad y calidad del agua salada:** Las aguas con bajo contenido en sales poseen facilidades de conversión en agua dulce, ya que con ellas la planta desalinizadora puede operar con un bajo consumo específico eléctrico (SEC) y un bajo dosado de químicos antiescalantes.
- **Capacidad de la planta:** Las plantas de gran tamaño reducen el coste de capital por unidad de producto. Sin embargo, un incremento en la capacidad de la planta, implica gastos económicos mayores.
- **Condiciones de localización de la planta:** La instalación de nuevas plantas desalinizadoras en zonas donde ya se hayan implantado otras plantas, podría eliminar costes referidos a la toma de agua salada, disposición de la salmuera, y pretratamiento del agua del mar.
- **Cualificación de la mano de obra:** La disponibilidad de personal cualificado, ingenieros y administración es proporcional a una alta disponibilidad, capacidad y bajo tiempo de inactividad de la planta.
- **Coste de la energía:** La disponibilidad de fuentes de energía eléctrica y de generación de vapor baratos tiene un gran impacto positivo sobre el coste de producción unitario
- **Vida de la planta y amortización:** Cuanto mayor sea la vida de la planta, menores serán los costes de capital.

### **4.5.2 COSTES DE PRODUCCIÓN: DIRECTOS, INDIRECTOS Y DE OPERACIÓN**

Los costes de producción de una planta desalinizadora se dividen en costes directos, costes indirectos y costes de operación. En la Figura 4.20 puede observarse un diagrama con los parámetros económicos más importantes que afectan a cada tipo de coste.



*Figura 4.20* .Factores de coste de los procesos de desalinización

## 1. Costes de Capital Directos

Los costes de capital directo cubren los costes adquisitivos de elementos de proceso, elementos auxiliares, costes de terreno, construcción y edificios. [7]

- **Equipos de proceso:** Este coste es uno de los más influyentes y depende del tipo y la capacidad del proceso. Dentro de esta categoría se incluyen:
  - Controles e instrumentación
  - Tuberías y Válvulas
  - Cableados eléctricos
  - Bombas
  - Sistemas de limpiado
  - Equipos de pre y post tratamiento
  - Admisión de agua salada y línea de descarga de salmuera
  - Plantas de cloración

- **Equipos Auxiliares:** Incluyen:
  - Aperturas de válvulas de admisión
  - Transmisión de tuberías
  - Tanques de Almacenamiento
  - Generadores y Transformadores
  - Bombas
  - Válvulas y tuberías
  
- **Costes de Edificios:** Varían en función del sitio y dependen del tipo de edificio. Los edificios propios de este tipo de plantas son:
  - Sala de Control
  - Laboratorios
  - Oficinas
  - Talleres

## 2. Costes de Capital Indirectos

Costes de la planta desalinizadora menos influyentes, expresados como porcentaje de los costes directos. [7]

- **Seguros:** Se pueden calcular como el 5% de los costes totales directos, aproximadamente.
- **Gastos Generales de Construcción:** Este coste se calcula como el 15% de los costes totales directos. Estos costes incluyen:
  - Beneficios complementarios
  - Carga de trabajo
  - Supervisión del campo
  - Facilidades temporales
  - Equipos de construcción
  - Pequeñas herramientas
  - Beneficios del contratista
  
- **Costes del propietario:** A este coste pertenecen las cuotas legales y de ingeniería. Se corresponden con el 10% de los costes totales directos.

- **Contingencia:** Los costes de contingencia de proyecto se representan como el 10% de los costes totales.

### 3. Costes de Operación

Los costes de operación cubren todos gastos producidos después de la puesta en marcha de la planta y durante la operación de la misma. Dentro de estos costes se incluyen el trabajo de los operarios (labores), energía, química, repuestos, entre otros. A continuación se describen los principales costes de operación: [7]

- **Electricidad:** Este coste varia en un rango desde 0.035€/kWh hasta 0.079 €/kWh , dependiendo de la localización de la planta.
- **Trabajo (Labores):** Este coste es función de la localización del sitio y depende de si la planta es del gobierno, o privada. La imposición de obligaciones de operación y mantenimiento reduce el tiempo de mano de obra de la planta, a la que pertenecen equipos de ingenieros y técnicos.
- **Cambios de membrana:** Este coste es exclusivo para los procesos de desalinización por osmosis. En función de los grados de salinidad de las aguas utilizadas, se aumentará la frecuencia del reemplazado de membranas osmóticas. Estos costes suponen entre un 5% y un 20% de los costes totales directos, cada año.
- **Mantenimiento y Repuestos:** Evaluado en torno a un 2% de los costes totales directos, cada año
- **Seguridad:** Se corresponde con un 0.5 % de los costes directos.
- **Coste de amortización o cargas fijas:** Este elemento representa los pagos anuales que cubren los costes totales directos e indirectos. Este parámetro es obtenido mediante el producto de los costes totales directos e indirectos por el denominado **factor de amortización**, definido como [23]:

$$a = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} + K_{seguridad}$$

Donde:

$i$ = Ratio de interés anual (entre 3 y 8 %)

$n$ =Vida de la Planta (25-30 años)

$K_{seguridad}$ = Ratio de seguridad anual (1%)

- **Químicos:** Los químicos utilizados en tratamiento y limpieza de aguas incluyen ácido sulfúrico, sosa cáustica, antiescalantes y cloro. Su coste depende de factores como la cercanía de la central a fabricantes de estos productos y de los precios en los mercados globales. Hay que destacar que los costes químicos difieren entre procesos térmicos (MSF, MED, etc) y procesos de membrana (Osmosis inversa), siendo más caro para estos últimos. La temperatura de la salmuera o la salinidad del agua de alimentación son factores influyentes en este coste también.



# CAPÍTULO 5

## CASO ESTUDIO: ANÁLISIS TECNO-ECONÓMICO DE UN SISTEMA CSP+D

---

### **5.1 INTRODUCCIÓN**

Tal y como se especificó en el objetivo del trabajo fin de grado, es necesario estudiar la posibilidad de que una planta desalinizadora sea capaz de cubrir los enormes gastos acuáticos de una planta termosolar de concentración en una zona desértica, además de ser esto rentable económicamente.

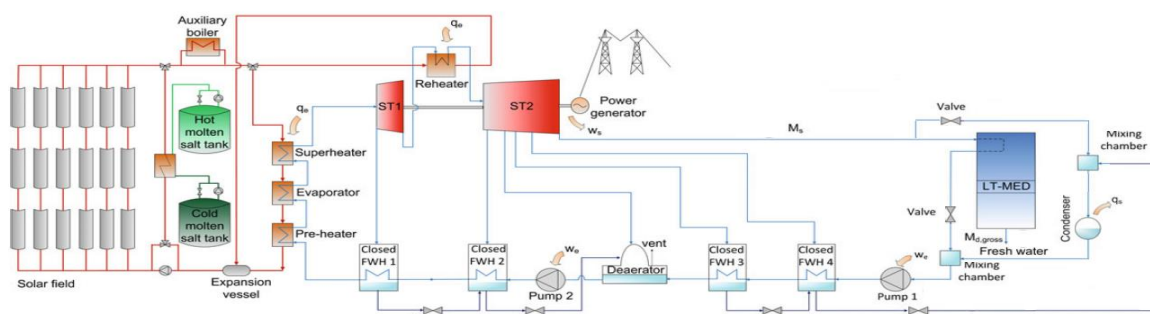
El objetivo de este capítulo es el diseño y análisis tecno-económico del proyecto de integración de una planta termosolar de tecnología colector cilindro parabólico a un sistema de desalinización de múltiple efecto. Se ven reflejados en esta sección todos los conocimientos expresados en capítulos anteriores, entre ellos, la selección de los sistemas más adecuados para integrarlos a CSP+D.

*Nota:* Durante esta sección, se analizan brevemente todos los puntos a considerar para la implantación de una central de las características CSP+D, como son la localización de la planta, las características del campo solar, etc. Sin embargo, el alcance de este proyecto está limitado al estudio y análisis del ciclo de producción de potencia y a su integración con la planta desalinizadora. El resto de aspectos de la central termosolar se comentan simplemente como acompañamiento del objetivo principal del trabajo de fin de grado y como partes a tener en cuenta si el proyecto es puesto en práctica en un futuro.

### **5.2 DIAGRAMA DE LA PLANTA CSP+D**

En la Figura 5.1 aparece representado el esquema del sistema combinado CSP+D, con el cual se ha trabajado durante el estudio.

Como se puede observar en la parte derecha de la figura anterior, la planta LT-MED forma parte del sistema de condensación del ciclo de potencia, junto al condensador propio de este tipo de centrales (torre húmeda, tal y como se especificó en el *Capítulo 3*). La existencia de la planta MED como condensador reduce la carga del condensador ordinario, además de producir agua desalinizada de gran utilidad para cubrir los enormes gastos acuáticos que precisan este tipo de centrales.



**Figura 5.1.** Diseño de la planta termosolar de colectores cilindro parabólicos integrada a la planta desalinizadora MED. Adaptado de [23]

Tal y como se muestra en la figura, el esquema del ciclo de vapor de la central termosolar ha variado con respecto al mostrado en el *capítulo 3* (Figura 3.19). El hecho de integrar una planta desalinizadora se traduce en pequeños cambios de algunos elementos del ciclo de producción de vapor. Estos son:

1. En el esquema CSP+D existen 5 extracciones de la turbina de baja presión *ST2* (4 extracciones más la salida al condensador) frente a las 6 presentes en el del *capítulo 3*. Como se indicó en el *capítulo 4*, la planta MED necesita alimentarse con una fuente de calor a la mayor temperatura posible para tener un buen rendimiento, siempre y cuando no supere el límite de *scaling*. Esta temperatura es de 70 °C. Esto hace que haya que eliminar una expansión de la turbina para no bajar de ese límite, ya que las expansiones suponen pérdida de temperatura. Esto se traduce en una pérdida de trabajo y rendimiento para la planta de generación de vapor.
2. De igual manera que existe una expansión menos, también existirá un FWH menos (se coloca un FWH por cada extracción), limitándose estos a 4.

El resto de la configuración del ciclo no varía.

### 5.2.1 CONSIDERACIONES DEL SISTEMA DE TRABAJO

Si se produce algún fallo o avería en la planta MED, no supone un problema ya que será el condensador normal del ciclo el encargado de realizar toda la condensación.

La planta desalinizadora utiliza como fuente de alimentación externa el vapor que sale de la turbina de baja presión *ST2*, el cual necesita ser condensado para poder ser bombeado posteriormente y continuar el ciclo *Rankine*. De esta manera, la energía que

de otro modo sería totalmente disipada al ambiente a través del sistema de refrigeración del ciclo, es utilizada para la producción de agua desalinizada.

### 5.3 ASIGNACIÓN DE LA LOCALIZACIÓN DEL SITIO

Resulta crucial la elección del lugar donde se podría colocar la planta. De ello dependen, al tratarse de una planta que funciona con la radiación solar y que necesita tener agua de mar a su disposición, dos factores fundamentales: la radiación solar y la cercanía a la costa respectivamente.

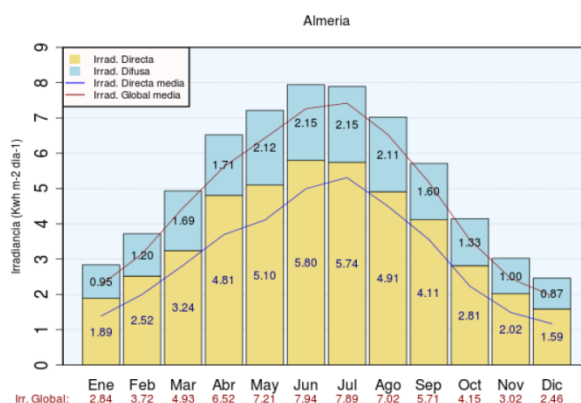
El lugar elegido es la costa de Almería (España), en el Mar Mediterráneo (Figura 5.2). Almería es una zona representativa de regiones con un extenso desarrollo de plantas CSP, altos índices de radiación solar directa ( $1990 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{año}}$ ) e importantes déficits de agua dulce, lo que lo convierte en un candidato ideal para implantar la central CSP+D [23].



**Figura 5.2.** Provincia de Almería (España).

Fuente: <https://es.wikipedia.org>

En la Figura 5.3 se observan las diferentes irradiaciones que afectan a Almería para cada mes del año.

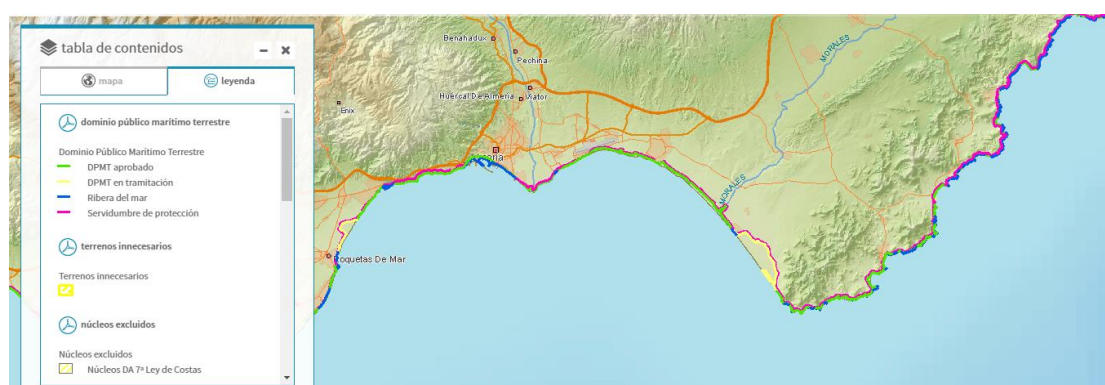


**Figura 5.3.** Índices de irradiación (directa, difusa y global) en la provincia de Almería en cada mes del año [1983-2005]. Fuente: [29]

En cuanto a la cercanía al mar, es importante conocer la legislatura que afecta a la edificación sobre zonas cercanas a la costa de Almería.

La Ley de Costas prohíbe la construcción de nuevas edificaciones en el litoral, tanto en dominio público marítimo terrestre (DPMT), que incluye las playas, aguas interiores, el mar territorial y los recursos naturales de la zona económica y la plataforma continental, como en su zona adyacente de servidumbre de protección. [19]

En el *Anexo II* se muestra la información sobre los terrenos que constituyen el DPMT y su integración mediante artículos en la Ley de Costas. Es crucial la consideración de la presente legislatura para la instalación de la central. Para el caso estudiado, Almería, quedan representados en la Figura 5.4 los límites de edificación costeros o *líneas de deslinde*, las cuales deberán ser considerados para el proyecto de instalación de la central.



**Figura 5.4.** Líneas de deslinde del DPMT correspondiente al litoral de Almería.

Fuente: <http://sig.magrama.es/dpmt/>

## **5.4 DISEÑO Y ANÁLISIS TÉCNICO**

### **5.4.1 CAMPO SOLAR**

Una vez se decide el lugar de la instalación en base a las legislaturas presentes y al tamaño de planta requerido, se procede a la instalación del campo solar.

Para este estudio, se han tomado el diseño y los parámetros de funcionamiento de campo solar de la planta termosolar de colectores cilindro parabólicos Andasol-1 de 50MW<sub>e</sub>, situada en Granada (Figura 5.5). El campo de colectores, el sistema de almacenamiento térmico, el generador de vapor, y elementos auxiliares del campo solar del proyecto planteado son de las mismas características que los de dicha planta.



**Figura 5.5.** Campo solar correspondiente a la planta Andasol 1 (Granada). Fuente: <https://www.google.es/maps>

Por los motivos expuestos en el *capítulo 3* (sección 3.2.1), además de perseguir similitudes con la planta Andasol-1, se ha seleccionado una orientación **Norte-Sur** para los colectores. El día de diseño elegido ha sido un día intermedio entre verano e invierno (**21 de Septiembre**). La hora de diseño ha sido el mediodía por ser el momento de mayor estabilidad de radiación (**12:00 am**).

Las condiciones establecidas para el campo solar se presentan en la **Tabla 5.1**:

**Tabla 5.1.** Características y parámetros del campo solar seleccionado para estudio (tipo *Andasol 1*). Fuente: <http://www.nrel.gov/> excepto donde se indica.

<b>Tecnología</b>	Colector Cilindro Parabólico
<b>Modelo</b>	SKAL-ET 150 Área apertura: 817.5 m <sup>2</sup> Longitud/colector: 150 m
<b>Orientación</b>	Norte-Sur
<b>Área de Apertura Campo Solar</b>	510 120 m <sup>2</sup>
<b>Nº Colectores</b>	624
<b>Módulos/Colector</b>	12
<b>Fluido de Transferencia de Calor</b>	Dowtherm A
<b>Temperatura entrada Campo de Colectores</b>	293°C
<b>Temperatura entrada Campo de Colectores</b>	393°C
<b>Radiación Solar Media Anual Directa (DNI) [23]</b>	1990 kWh/(m <sup>2</sup> ·año)
<b>Producción anual vapor producida por el campo solar [18]</b>	464.703.000 kWh <sub>t</sub> /año
<b>Almacenamiento Térmico</b>	2 Tanques (H: 14 m; D:36 m) Indirecto Capacidad: 7,5horas (1010 MWh) Sales: 60% Nitrato de Sodio (NaNO <sub>3</sub> ) 40% Nitrato de Potasio (KNO <sub>3</sub> )

### 5.4.2 DISEÑO Y ANÁLISIS DEL CICLO DE POTENCIA

En la **Tabla 5.2** se recogen los datos de funcionamiento y algunas características del ciclo de potencia que, de la misma manera, están obtenidos de la planta termosolar *Andasol-1*.

**Tabla 5.2.** Características operacionales de la central termosolar de estudio. Fuente: [18]

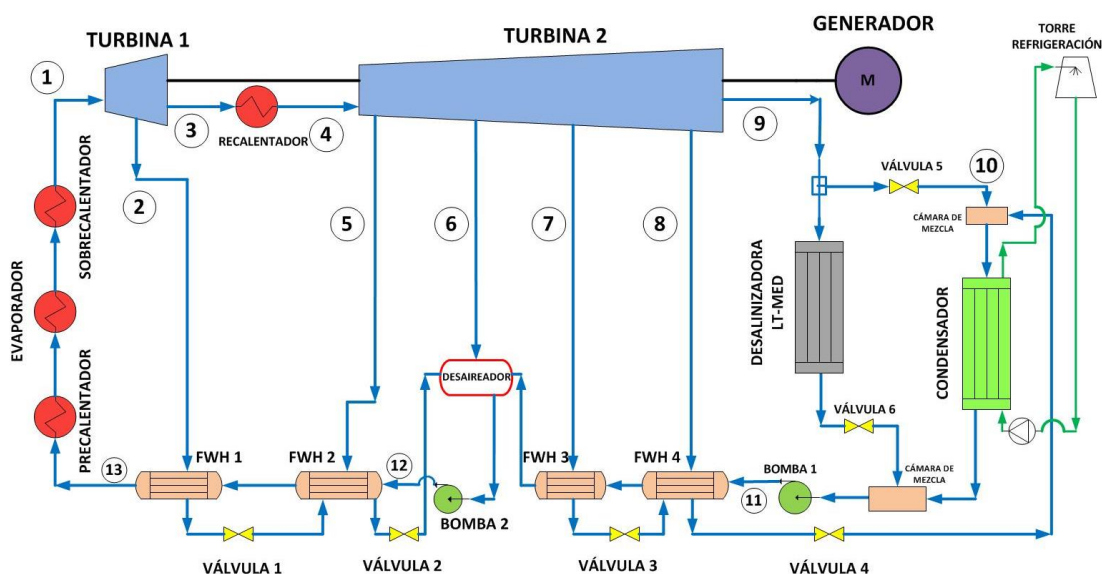
<b>Capacidad de Turbina</b>	49,9 MW <sub>e</sub> nominal
<b>Horas de operación al año</b>	3644 horas a plena carga
<b>Generación anual eléctrica</b>	181.831.000 kWh <sub>e</sub>
<b>Producción evitada de CO<sub>2</sub></b>	152.000 tm <sup>a</sup> /año

<sup>a</sup>tm: tonelada métrica

El número de horas de operación de la central será de gran utilidad para conocer el gasto de agua anual que tendrá que producir la planta desalinizadora

Para estudiar el funcionamiento del ciclo de vapor y sobre todo, tener un valor del orden de magnitud del calor que se requiere condensar en este tipo de centrales, se realiza en esta sección la simulación térmica del ciclo.

En la Figura 5.6 se recoge el esquema del ciclo de producción de potencia, con el cual se ha realizado la simulación térmica en el proyecto. Se trata del mismo sistema que el representado en la Figura 5.1. También se puede observar el sistema de refrigeración propio de las centrales termosolares que, como se especificó razonadamente en el capítulo 3, se trata de un sistema de enfriamiento evaporativo o por torre húmeda.



**Figura 5.6.** Ciclo de producción de potencia CSP+D (incluido sistema de refrigeración por torre húmeda)

Tal y como se observa, existe una extracción de la turbina de alta presión (*Turbina 1*) que accede al FWH 1 y cuatro extracciones de la turbina de baja presión (*Turbina 2*) que se dirigen hacia los FWH 2, 3 y 4. La salida de la turbina de baja presión (*Punto 9*) es condensada entre la desalinizadora *LT-MED* y el condensador estándar (refrigeración con torre húmeda). Tras la condensación, el fluido de trabajo es bombeado hacia el generador de vapor, pasando previamente por los distintos calentadores de los FWHs. El vapor sobrecalentado, accede a la turbina de alta, completándose así el ciclo.

Para la simulación del comportamiento del ciclo, se ha utilizado el programa *CyclePad*.

Para poder realizar la simulación, se han tomado algunas hipótesis de simplificación (presentes en **Tabla 5.3**) y una serie de condiciones de operación (**Tabla 5.4**) correspondientes a la planta Andasol-1, implantadas como variables de entrada en los diferentes puntos del sistema representado en la Figura 5.6. Estas variables (presión y temperatura) son las que permiten calcular los trabajos, flujos de calor y gastos máscicos en los diferentes tramos del ciclo.

**Tabla 5.3.** Hipótesis de simplificación de los elementos del ciclo

<b>Condensador</b>	Isobárico
<b>Generador de Vapor</b>	Isobárico
<b>FWH</b>	Isobárico TTD = 4 °C Contracorriente DCA = 5 °C
<b>Desaireador</b>	Isobárico TTD = 0°C
<b>Bombas</b>	Isentrópicas Adiabáticas
<b>Turbinas</b>	Isentrópicas Adiabáticas
<b>Separadores (Splits)</b>	Isoparamétricos
<b>Cámaras de Mezcla</b>	Isobáricas

Además de estas hipótesis, se ha considerado:

- Estudio del ciclo en estado estacionario ( $\frac{d}{dt} = 0$ )
- Salida del Condensador estándar: Líquido Saturado
- Salida del desaireador: Líquido saturado



**Tabla 5.4.** Condiciones de operación aplicadas al ciclo en la simulación (basadas en la referencia Blanco-Marigorta et al, 2011 [2] excepto donde se indica

Punto del Diagrama	Parámetros	Valores
1	Temperatura y Presión	373 °C ; 100 bar
2	Presión	33,5 bar
3	Presión	16,5 bar <sup>a</sup>
4	Temperatura y Presión	373,4 °C ; 16,5 bar
5	Presión	14 bar
6	Presión	6,18 bar
7	Presión	3,04 bar
8	Presión	1,17 bar
9	Presión	0,31 bar <sup>b</sup>
10	Presión	0,063 bar <sup>c</sup>
11	Presión	6,18 bar
12	Presión	100 bar <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Valores modificados respecto a la referencia [2] debido a hipótesis de simplificación

<sup>b</sup>Es importante analizar el valor impuesto en el punto 9 ( $P=0.31$  bar). Este valor de presión es el correspondiente a la temperatura de saturación máxima permitida en las plantas LT-MED para evitar problemas de incrustaciones (70°C).

$$P_{\text{sat}} = 0.31 \text{ bar} \longrightarrow T_{\text{sat}} \sim 70^{\circ}\text{C}$$

<sup>c</sup>La presión impuesta en el punto 10 se corresponde a la presión de saturación del fluido de trabajo durante su paso por el condensador ordinario. Para la estimación de este valor ha sido necesario el estudio de las condiciones ambiente del día y hora del diseño (21 de Septiembre a las 12:00), parámetros clave que afectan al diseño de la torre húmeda (**Tabla 5.5**).

**Tabla 5.5.** Condiciones ambiente a la hora y fecha de diseño. Fuente: [23]

Temperatura Ambiente (°C)	Radiación Normal Directa (W/m <sup>2</sup> )	Humedad Relativa (%)
27,1	884	43

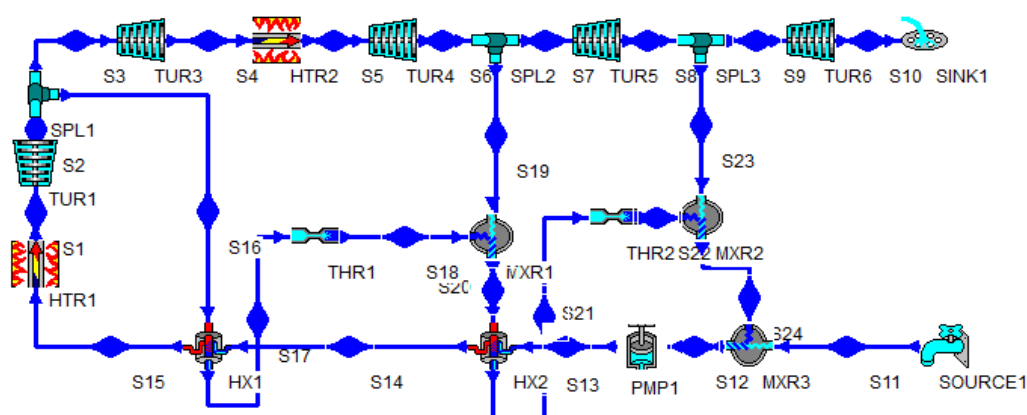
Una vez se conocen los datos ambientales, es posible determinar la presión y en consecuencia, la temperatura de saturación del vapor en el condensador estándar. Esta temperatura es función de tres factores: la aproximación de la torre (la diferencia entre la temperatura de salida del agua de la torre de refrigeración y la temperatura de bulbo húmedo), el rango de la torre de refrigeración (diferencia entre la temperatura del agua de refrigeración a la entrada de la torre y a la salida de la misma) y la diferencia entre la temperatura a la entrada y a la salida del agua de refrigeración en el condensador. Estos valores se corresponden con 7°C, 8°C y 3°C respectivamente (Blanco-Marigorta et al, 2011). En función de estos, la temperatura de condensación es 37°C. La presión correspondiente a esta temperatura de saturación es la representada en el punto 10 de la **Tabla 5.4**.



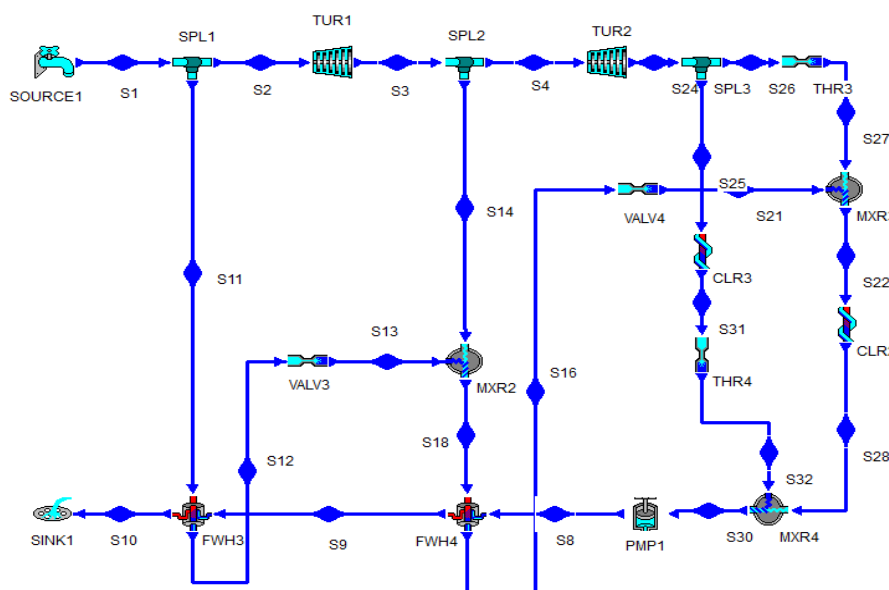
## ○ SIMULACIÓN Y RESULTADOS

Una vez definidos todos los parámetros, simplificaciones e hipótesis, se realiza la simulación del ciclo en *Cyclepad*. Mediante este software, quedan aplicadas de manera sistemática las ecuaciones del modelado del ciclo de vapor analizadas en el capítulo 3.

Para la simulación se ha separado el ciclo en dos partes: la parte de alta presión (Figura 5.7) y la parte de baja presión (Figura 5.8). Los resultados obtenidos de la simulación pueden observarse en la **Tabla 5.6**



**Figura 5.7.** Diagrama de alta presión representado en *Cyclepad*



**Figura 5.8.** Diagrama de baja presión representado en *Cyclepad*

**Tabla 5.6.** Resultados obtenidos de la simulación del ciclo de potencia

Parámetro	Resultado
Calor de Condensación (LT-MED+ Condensador estándar)	80,35 MW
Calor aportado en Precalentador	20,231 MW
Calor aportado en Evaporador	68,77 MW
Calor aportado en Sobrecalentador	14,79 MW
Calor aportado en Recalentador	26,12 MW
Rendimiento del Ciclo	38,5 %
Gasto másico total en el ciclo	52,21 kg/s
Trabajo producido por turbina alta presión	18,67 MW
Trabajo producido por turbina de baja presión	31,88 MW
Potencia Total generada	50.55 MW

Una vez realizado el estudio del ciclo de potencia, se conoce el calor que es necesario condensar en el ciclo. La desalinizadora, cuya función es cubrir los gastos de agua de la central, se encargará además de condensar un porcentaje de ese calor, reduciéndose así la carga del condensador estándar.

### 5.4.3 DISEÑO Y ANÁLISIS DE LA PLANTA DESALINIZADORA DE MÚLTIPLE EFECTO MED

Para poder realizar el diseño de la planta MED, es fundamental conocer la cantidad de agua destilada que esta debe producir para cubrir todos los gastos de agua de la central termosolar. Estas necesidades aparecen reflejadas en la **Tabla 5.7**.

**Tabla 5.7.** Consumos específicos de agua destilada en una central CSP+D (basadas en la referencia [24])

Torre refrigeración (L/MWh <sub>e</sub> )	3000
Limpieza espejos (L/MWh <sub>e</sub> )	70
Ciclo de Potencia (L/MWh <sub>e</sub> )	175
Otros consumos (L/MWh <sub>e</sub> )	2,9
<b>TOTAL (L/MWh<sub>e</sub>)</b>	<b>3247,9</b>

Para el caso estudio, y como se especifica en la **Tabla 5.2**, la central genera 181.831.000 kWh<sub>e</sub> al año.

Por tanto:

**Tabla 5.8.** Consumo anual de agua de la central CSP+D proyectada

Consumo específico agua central CSP+D	3247,9 L/MWhe
Potencia generada anualmente	181 831 MWhe
<b>Consumo anual de agua requerido en la central CSP+D proyectada</b>	590.568.905 L

Conociendo el consumo anual de agua requerido en la central proyectada y las horas anuales de funcionamiento de la central, es posible determinar el flujo másico de destilado que debe producir la planta desalinizadora para cubrir el 100% de la demanda acuática de la central, objetivo del trabajo.

**Tabla 5.9.** Requisitos de la planta MED proyectada para cubrir gastos acuáticos de la central

<b>Capacidad MED (kg/s)</b>	<b>45,018</b>
<b>Capacidad MED (m<sup>3</sup>/hora)</b>	<b>162,066</b>
Horas de funcionamiento de la central anualmente	3644
Capacidad anual producida en la central CSP+D proyectada (L)	590.568.504 <sup>a</sup>
% de demanda cubierta	100%

\*Densidad del agua= 1000 kg/m<sup>3</sup>

<sup>a</sup> Variación respecto al consumo requerido debido a método de redondeo

El valor obtenido de capacidad representa el gasto másico de destilado de la planta, por lo que se establece el punto de partida para realizar el diseño de la desalinizadora mediante el modelo escrito y analizado en la sección 4.4.4 del *capítulo 4*.

El seguimiento, análisis e iteraciones del modelo se ha realizado con el software *Matlab R2011a*. El código de programación se encuentra disponible en el *Anexo I*.

Los parámetros de entrada (inputs) aparecen reflejados en la **Tabla 5.10**.

**Tabla 5.10.** Inputs de la simulación realizada de planta MED (basado en referencias indicadas)

Parámetros entrada	Valor
Número de Efectos	7 <sup>d</sup>
Tª del vapor motriz saturado ( $T_s$ )	70 °C
Tª del vapor formado en el último efecto ( $T_n$ )	40 °C <sup>a</sup>
Tª agua de mar a la entrada ( $T_{cw}$ )	25 °C <sup>b</sup>
Tª agua del mar de alimentación ( $T_f$ )	35 °C <sup>a</sup>
Concentración de salmuera a la salida ( $X_n$ )	70.000 ppm <sup>a</sup>
Concentración de salmuera a la entrada ( $X_f$ )	38.000 ppm <sup>c</sup>
Gasto másico de destilado ( $M_d$ )	45,018 kg/s
Pérdidas termodinámicas en cada efecto	2 °C <sup>a</sup>
Coeficiente Global de Transferencia de Calor (U) en primer efecto <sup>a</sup>	$2.4 \frac{kW}{m^2 \cdot ^\circ C}$

<sup>a</sup> [7] ;

<sup>b</sup> <http://seatemperature.info/> ; <sup>c</sup> <http://www.clubdelamar.org/> (Propiedades del mar Mediterráneo en Almería)

<sup>d</sup> Cuantos más efectos se instalen en una planta MED, mayor es el rendimiento, esto es el *Performance Ratio* PR [22]. En la práctica en este tipo de desalinizadoras es común obtener un PR aproximadamente igual al número de efectos [7]. Este parámetro indica un resultado de diseño coherente. En la simulación realizada, debido a los parámetros de trabajo y sobre todo a las pérdidas termodinámicas en los efectos, la máxima configuración posible es de 7 efectos.

## ○ RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA SIMULACIÓN

Una vez realizada la convergencia del modelo planteado, se han obtenido los siguientes parámetros de diseño y operacionales de la planta MED. Se encuentran reflejados en la **Tabla 5.11** y **Tabla 5.12**.

**Tabla 5.11.** Resultados obtenidos en la simulación de la planta MED

Performance Ratio	6,9
Calor Evacuado (MW)	15,219
% Condensación del ciclo en planta MED	18,94%
Capacidad de la planta (m3/día)	3889,58
Agua Mar Enfriamiento "Cooling Seawater" (kg/s)	283,18
Motive Steam (kg/s)	6,52
Área específica (m <sup>2</sup> /(kg/s))	481,73

**Tabla 5.12.** Resultados de diseño y operacionales obtenidos en cada efecto en la simulación

Efecto	U (kW/m <sup>2</sup> · °C)	B (kg/s)	D(kg/s)	X(ppm)	T (°C)	ΔT <sub>efectos</sub> (°C)	A (m <sup>2</sup> )
1	2,4 <sup>1</sup>	91,985	6,492	40682,06	67,82	2,18	2907,85
2	2,28	85,508	6,477	43763,5	65,52	4,3	2907,85
3	2,17	79,047	6,461	47340,29	63,11	4,42	2907,85
4	2,06	72,604	6,444	51541,74	60,56	4,54	2907,85
5	1,95	66,178	6,426	56546,48	57,89	4,68	2907,85
6	1,86	59,77	6,407	62608,35	55,07	4,82	2907,85
7	1,76	53,459	6,311	70000	40	4,97	2907,85
Condensador final	1,68				40	0	1331,48

\*ΔT<sub>efectos</sub> (°C) es la caída de temperatura entre ese efecto y el anterior

<sup>1</sup> El valor del coeficiente global de transferencia de calor en el primer efecto ha sido asumido en la **Tabla 5.10**. Para que se cumplan las hipótesis del modelo, es decir, que los calores evacuados y las áreas sean idénticas en todos los efectos, y analizando que la caída de temperatura entre efectos es cada vez mayor (ver **Tabla 5.12**), según la ecuación general de transferencia de calor:

$$Q = A \cdot U \cdot \Delta T$$

El coeficiente global de transferencia de calor ira disminuyendo conforme se avanza en los efectos, de manera que: [7]

$$U_{i+1} = 0.95 \cdot U_i$$

## 5.5 ANÁLISIS ECONÓMICO

### 5.5.1 CÁLCULO DE COSTES DE LA PLANTA MED

Para el cálculo del coste económico de la planta desalinizadora, se utilizarán los conceptos aplicados en el *capítulo 4* (apartado 4.5), pero de una manera simplificada.

Se considerarán costes directos y costes de operación, excluyendo costes menos importantes como los costes indirectos (seguros, contingencia, etc.):

- **Costes de inversión o Costes de capital directos:** Representa el desembolso inicial necesario para el montaje y construcción de la planta desalinizadora. Estos costes son proporción directa con la cantidad de agua destilada producida. Estos costes son considerados a  $1080 \frac{\text{€}}{\left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}}\right)}$ . [23]

- **Costes de Operación:** Costes anuales formados por el consumo de potencia eléctrica, los costes químicos y los costes en labores de operación. Estos costes permanecen hasta el fin de funcionamiento de la planta.

Se consideran las siguientes hipótesis y datos de entrada (**Tabla 5.13**) para el análisis económico:

- La disponibilidad de la planta es del 100%
- El agua destilada posee una densidad de  $1000 \text{ kg/m}^3$  y se encuentra completamente libre de sales.

**Tabla 5.13.** Parámetros de entrada para el análisis económico (basado en referencias indicadas)

Vida de la planta <sup>a</sup>	25 años
Coste de la electricidad <sup>b</sup>	0,095 €/kWh
Performance Ratio (PR)	6,9
Costes Específicos de Labores de Operación <sup>c</sup>	0,088 €/m <sup>3</sup>
Costes Específicos de Productos Químicos <sup>d</sup>	0,024 €/m <sup>3</sup>
Consumo Específico Eléctrico (SEC) <sup>e</sup>	1,5 kWh/m <sup>3</sup>
Capacidad de la Planta	3889,58 m <sup>3</sup> /día

<sup>a</sup> [16]; <sup>b</sup> <http://tarifaluzhora.es/>; <sup>c</sup> [7]; <sup>d</sup> [1]; <sup>e</sup> [23]

Las ecuaciones empleadas para el cálculo de costes **anuales** son:

- **Coste de potencia eléctrica** = Coste. electricidad  $\left(\frac{\text{€}}{\text{kWh}}\right) \cdot \text{SEC} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}\right) \cdot \text{Dispo. Planta} \cdot \text{Cap. Planta} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{h}}\right) \cdot N^{\circ} \text{ de horas anuales}$
- **Coste prods químicos** = Coste especif Prods Químicos (€/m<sup>3</sup>) · Dispo. Planta · Cap. Planta (m<sup>3</sup>/h) · N° de horas anuales
- **Coste labores de operación** = Coste especif Labores Operación · Dispo. Planta · Cap. Planta (m<sup>3</sup>/h) · N° de horas anuales

Finalmente, en la **Tabla 5.14** aparecen reflejados los resultados del cálculo de costes de la planta MED.

**Tabla 5.14.** Costes asociados a la instalación y conservación de la planta MED

Costes de Inversión	4,2 Mio.€	
<b>Costes de Operación Anuales</b>	Coste anual potencia eléctrica	84.156 €/año
	Costes anuales químicos	14.173,64 €/año
	Costes anuales labores de operación	51.832,41 €/año
	Coste Operación Total	150.162 €/año
	Coste Operación Unitario Anual	0,254€/m <sup>3</sup>

\*Mio.€ = Millones de Euros

### 5.5.2 ANÁLISIS DE RENTABILIDAD DE LA PLANTA MED

Una vez obtenidos los resultados del análisis de costes, es indispensable para el objetivo del trabajo conocer si los costes económicos que generan la instalación y mantenimiento de una planta MED son rentables a lo largo de la vida de la planta. Para ello, durante este apartado final se realizará una comparativa entre dos escenarios, uno contando con la instalación de la planta MED y el otro sin ella, es decir, contando con los gastos económicos de abastecimiento de agua para la central CSP mediante otros medios.

Para el cálculo de la rentabilidad del proyecto, se ha utilizado la herramienta del **Valor Actual Neto (VAN)**. La fórmula del VAN es:

$$VAN = -I_0 + \sum_{i=1}^n \frac{V_t}{(1+r)^i}$$

donde

$V_t$  representa los flujos de caja en el periodo  $t$

$I_0$  representa el desembolso económico inicial de la planta

$n$  es el número de periodos a considerar (Vida de la Planta)

$r$  es la tasa de descuento

#### ❖ CÁLCULO DE LA TASA DE DESCUENTO $r$ o WACC

El WACC (del inglés Weighted Average Cost of Capital), denominado en español Promedio Ponderado del Costo de Capital (CMPC) es la tasa de descuento que permite calcular el coste medio de los activos del proyecto planteado (planta desalinizadora), atendiendo a como se ha financiado el capital propio (aportación de los socios) y los recursos de terceros (deudas y préstamos).

Para este proyecto es una gran herramienta, puesto que se pretende simular la puesta en el mercado de la empresa inversora de la central MED estudiada.

La fórmula del WACC es la siguiente

$$WACC = K_e \cdot \frac{CAA}{CAA + D} + K_d \cdot (1 - \tau) \cdot \frac{D}{CAA + D}$$

donde

$K_e$  es el denominado *Cost of equity* o Costo de Oportunidad de los accionistas, es decir, lo que le cuesta a la empresa financiar sus recursos propios provenientes de accionistas o lo que es lo mismo, la tasa de retorno que exige el accionista para el riesgo de la empresa.

$CAA$  es la proporción que representa el capital que es aportado por los accionistas sobre el total de recursos de la empresa.

$D$  es la proporción que representa la deuda externa contraída

$K_d$  es el costo de la deuda financiera y para este caso concreto, el tipo de interés bancario anual (TAE)

$\tau$  es la tasa de impuesto a las ganancias, es decir, el impuesto de sociedades

- **Cálculo de  $K_e$  (Cost of Equity)**

Determinada con el modelo de valoración de activos financieros, denominada en inglés *Capital asset pricing model (CAPM)*, según la ecuación:

$$K_e = r_f + \beta_l \cdot (r_m - r_f)$$

donde

$r_f$  es el rendimiento de un activo libre de riesgo (0.14% BUND alemán)

$r_m$  es el rendimiento del mercado (16.14 % IBEX 35)

$\beta_l$  es el coeficiente de riesgo de los activos del proyecto, que incluye las deudas (*Beta levered*)

Para la determinación del riesgo del proyecto planteado  $\beta_l$ , se ha buscado en las hojas financieras del año 2013 de una empresa dedicada al mismo sector que el de este proyecto, las energías renovables. Se trata de la empresa ABENGOA.

Se ha obtenido el  $\beta_u$  (Beta unlevered) de ABENGOA, definida como el coeficiente de riesgo de los activos sin tener en cuenta las deudas. Este coeficiente, al no tener en cuenta las deudas, se asume como aproximación ser es el mismo tanto para la empresa del proyecto como para ABENGOA, por ser del mismo sector.

El trabajo realizado ha sido el cálculo del  $\beta_l$  del proyecto a partir del  $\beta_u$ , según la ecuación:



$$\beta_u = \frac{\beta_l}{1 + (1 - T) \cdot \left(\frac{D}{CAA}\right)}$$

○ **Cálculo del resto de parámetros**

• **Cálculo del costo de la deuda financiera (TAE):**

El TAE impuesto en el cálculo se ha considerado en función al porcentaje de la deuda financiera contraída (**Tabla 5.15**), según un estudio sobre la rentabilidad exigida por las entidades financieras dependiendo del nivel de endeudamiento.

**Tabla 5.15.** TAE aplicado en el caso estudio en función de la deuda contraída

Deuda	TAE (Kd)
25% ≥ D > 0%	6%
35% ≥ D > 25%	9%
50% ≥ D > 35%	14%
75% ≥ D > 50%	18%
100% ≥ D > 75%	23%

• **Cálculo del impuesto de sociedades τ:**

Se supone que se tratará de una gran empresa, por lo que se pone el impuesto de sociedades perteneciente a este grupo en España, esto es un 30%.

Una vez definidos todos los parámetros, se calcula el WACC y se optimiza su valor para alcanzar el menor valor posible (tasa de descuento menor supone mayor rentabilidad). Esta optimización se ha realizado con la herramienta *Solver* de *Microsoft Excel*. Los resultados obtenidos aparecen reflejados en la **Tabla 5.16**

**Tabla 5.16.** Resultados obtenidos del cálculo de la tasa de descuento o WACC

β unlevered	0,9288
β levered	1,1455
Cost of equity (Ke)	18,47%
Costo de la deuda (Kd)	6%
Imp. Sociedades	30%
%Fondos Propios Óptimo	75%
%Deuda Óptimo	25%
TAE	6%
<b>WACC</b>	<b>14,90%</b>

Por tanto, la tasa de descuento a aplicar en el proyecto es de 14,9 %

### ❖ COMPARACIÓN DE ESCENARIOS (VAN)

Una vez obtenida la tasa de descuento, se realiza la comparativa de escenarios mencionada al principio. Se contemplan 2 escenarios posibles. El primer escenario es la instalación de la planta desalinizadora MED y su utilización durante 25 años (costes de inversión más costes de operación anuales desalinizadora). La segunda es la no inversión en planta desalinizadora, considerando así costes anuales en abastecimiento de agua dulce para su uso industrial en la central CSP+D, tal y como se realiza en las plantas termosolares convencionales.

De esta forma, aparece reflejada la comparativa en la **Tabla 5.17**.

**Tabla 5.17.** Resultados de la comparativa realizada entre los dos escenarios

	Escenario 1 (con MED)	Escenario 2 (sin MED)
Inversión Inicial en planta MED	4,2 Mio.€	0
Costes Anuales de Mantenimiento	150.162 €/año	885.853,36 €/año *
<b>VAN 1-VAN 2</b>	<b>POSITIVO</b>	

\*Coste de agua de uso industrial en Andalucía: 1,5€/m<sup>3</sup>. Este coste representa de manera simplificada el precio medio de los servicios de abastecimiento, vertido y saneamiento de agua para uso industrial. Para un primer cálculo del coste de agua se ha utilizado para el proyecto.

Fuente: <http://servicios2.marm.es/>

El VAN del escenario 1 es superior al escenario 2, es decir, el proyecto que cuenta con la instalación de un sistema de desalinización es más rentable que el que no lo considera. Merece la pena por tanto cubrir los gastos de instalación y mantenimiento de la planta MED con respecto a los gastos de suministro de agua procedente de otros medios.

La conclusión de este apartado implica que no sólo se cubrirán todos los litros de agua que necesita la central CSP+D, sino que además la inversión económica en la planta MED se amortiza a lo largo de los 25 años de vida de esta frente al coste cada vez más elevado que presenta el suministro de agua dulce en una provincia como Almería, donde los recursos de esta son cada vez más escasos y necesitados.

## CONCLUSIONES Y NUEVAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

---

Tal y como se ha demostrado durante el trabajo, el proyecto CSP+D es capaz de resolver tanto técnica como económicamente los problemas de agua y energía (*Water and Energy*). La tecnología de CSP, en concreto de colectores cilindro parabólicos, produce energía eléctrica limpia sustituyendo a los tan contaminantes combustibles fósiles. La planta desalinizadora de múltiple efecto MED, es capaz de generar mediante un recurso tan abundante como el agua del mar, agua dulce para cubrir los enormes gastos que precisa la planta CSP. Además, condensa parte del vapor del ciclo de producción de potencia, reduciendo la carga al condensador normal de la central.

En definitiva, CSP+D es igual a producción de electricidad de una manera sostenible y económica. Esta conclusión está avalada por todos los puntos que han sido desarrollados durante este trabajo:

- Selección justificada de las tecnologías de concentración solar y desalinización más apropiadas para aplicarse al proyecto CSP+D.
- Estudio de factores que afectan a la implantación geográfica de una central termosolar y de una planta desalinizadora: legislación, condiciones meteorológicas, distribución de colectores en el campo solar, etc.
- Diseño, simulación y análisis del ciclo de potencia de una central CSP+D proyectada, obteniéndose de esta todos los parámetros funcionales necesarios para la implantación del sistema (rendimiento, potencias generadas, calores aportados, calores cedidos, flujos de vapor, etc.)
- Diseño, simulación y análisis técnico de una planta desalinizadora de múltiple efecto MED capaz de adaptarse a las necesidades de la planta termosolar, sin generar en esta relevantes problemas de funcionamiento.
- Análisis y comparativa económica de costes y rentabilidad de la planta desalinizadora, mediante la utilización de herramientas como el Valor Actual Neto (VAN), con el previo estudio de la tasa de descuento que se debe aplicar en un proyecto de las características presentadas.

## BIBLIOGRAFÍA

---

Con este proyecto se abre un nuevo punto de mira en las energías renovables. Queda justificado en este trabajo que CSP+D es viable tanto técnica como económicamente, y debe aprovecharse para continuar su investigación y desarrollo.

Por ejemplo, es interesante la evaluación de estos sistemas en los países de Oriente Medio y Norte de África, donde los recursos de agua alcanzan los niveles más críticos y donde las temperaturas son punteras por lo alto en el planeta. Egipto podría ser un buen candidato a la instalación y prueba de una central de este tipo.

También se abren nuevos caminos a la investigación por medio del diseño de otros sistemas CSP+D. Por ejemplo, aprovechar la elevada madurez de los sistemas de desalinización de osmosis inversa o las elevadas eficiencias de los sistemas MED con termocompresión de vapor para emplearlos en una planta de concentración solar.

Finalmente, y de cara a un futuro en la que numerosas mejoras asoman la cabeza en el mundo de la energía solar de concentración, es interesante ser capaces de conseguir sistemas CSP+D con otros sistemas de concentración solar. Esto es por ejemplo el aprovechamiento del potencial de torres de receptor central como fuente de alimentación de desaladoras.

Un sinfín de nuevos caminos por los que llegar a un futuro sostenible marcado por la ingeniería y la ciencia.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] BLANCO, J., ALARCÓN-PADILLA, D.C. and PALENZUELA, P., 2013. *Assessment of CSP+D Potential in the MENA Area*.
- [2] BLANCO-MARIGORTA, A.M., SANCHEZ-HENRÍQUEZ, M.V. and PEÑA-QUINTANA, J.A., 2011. Exergetic Comparison of Two Different Cooling Technologies for the Power Cycle of a Thermal Power Plant. *Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 1966-1972.
- [3] BRICEÑO, S., 2011. *Estudio Económico y Termoeconómico De Una Central Termosolar Híbrida Solar-Biomasa*. Universidad de Sevilla.
- [4] CENGEL, Y.A. and BOLES, M.A. *Thermodynamics. an Engineering Approach 6ª Ed.* New York: McGraw Hill.
- [5] COLMENAR-SANTOS, A., BORGE-DIEZ, D., MOLINA, C.P. and CASTRO-GIL, M., 2014. Water Consumption in Solar Parabolic Trough Plants: Review and Analysis of the Southern Spain Case. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 34, pp. 565-577.
- [6] DE LA FUENTE, S. *Conceptual Design and Optimization of a Solar Thermal Plant with Parabolic Trough Technology*. Universidad Carlos III de Madrid.
- [7] EL-DESSOUKY, H.T. and ETOUNEY, H.M., 2002. *Fundamentals of Salt Water Desalination*. Elsevier.
- [8] ETOUNEY, H., EL-DESSOUKY, H., FAIBISH, R. and GOWIN, P., 2002. Economics of Thermal and Membrane Desalination Processes. *Chem.Eng.Prog.*, vol. 98, pp. 32-39.
- [9] Fichtner and DLR., 2011. *MENA Regional Water Outlook. Part II: Desalination using Renewable Energy*.
- [10] International Energy Agency., 2012. Water for Energy. Is energy becoming a thirstier resource? In: *World Energy Outlook. Water for Energy. is Energy Becoming a Thirstier Resource?*.
- [11] International Renewable Energy Agency IRENA., 2012. Volume 1: Power Sector. Concentrating Solar Power. In: *Renewable Energy Technologies: cost analysis series. Volume 1: Power Sector. Concentrating Solar Power*.
- [12] IZQUIERDO, M., 2013. Capítulo 10. Centrales Termosolares. In: *Centrales Termosolares. Capítulo 10. Centrales Termosolares*.
- [13] IZQUIERDO, M., 2013. Capítulo 2. Radiación solar sobre el plano inclinado. In: *Capítulo 2. Radiación Solar Sobre El Plano Inclinado*.
- [14] IZQUIERDO, M., 2013. Capítulo 4. Otros componentes del colector: Configuración y seguridad de las instalaciones térmicas. In: *Sistemas térmicos de energía solar para la producción de calor y frío. Capítulo 4. Otros Componentes Del Colector: Configuración y Seguridad De Las Instalaciones Térmicas*.
- [15] IZQUIERDO, M., 2013. Capítulo 8. Tecnología de colectores para generación de calor. In: *Colectores de energía solar para la producción de calor. Capítulo 8. Tecnología De Colectores Para Generación De Calor*.
- [16] KALTSCHMITT, M., STREICHER, W. and WIESE, A., 2007. *Renewable Energy: Technology, Economics and Environment*. Springer Science & Business Media.
- [17] KHAWAJI, A.D., KUTUBKHANAH, I.K. and WIE, J., 2008. Advances in Seawater Desalination Technologies. *Desalination*, vol. 221, no. 1, pp. 47-69.

## BIBLIOGRAFÍA

- [18] LÓPEZ MATEOS, J. *Central Termosolar ANDASOL-1*.
- [19] MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. *Ley De Costas Para La Protección Ambiental y El Desarrollo Sostenible De Nuestro Litoral*. Available from: <http://www.magrama.gob.es/es/costas/temas/modificacion-ley-costas/objetivos-contenido-reforma/ley-costas-objetivos.aspx>.
- [20] MORAN, M.J. and SHAPIRO, H.N., 2004. *Fundamentos De Termodinámica Técnica*. Reverté.
- [21] NAFEY, A., FATH, H. and MABROUK, A., 2006. Thermo-Economic Investigation of Multi Effect Evaporation (MEE) and Hybrid Multi Effect evaporation—multi Stage Flash (MEE-MSF) Systems. *Desalination*, vol. 201, no. 1, pp. 241-254.
- [22] ORTEGA, B. *Modelado De Un Sistema De Desalación De Agua De Mar Basado En La Tecnología De Destilación Multiefecto Con Alimentación En Serie*. Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Sevilla.
- [23] PALENZUELA, P., ALARCÓN-PADILLA, D. and ZARAGOZA, G., 2015. *Concentrating Solar Power and Desalination Plants. Engineering and Economics of Coupling Multi-Effect Distillation and Solar Plants*. Springer.
- [24] PALENZUELA, P., ALARCÓN-PADILLA, D. and ZARAGOZA, G., 2015. Large-Scale Solar Desalination by Combination with CSP: Techno-Economic Analysis of Different Options for the Mediterranean Sea and the Arabian Gulf. *Desalination*, vol. 366, pp. 130-138.
- [25] PALENZUELA, P., ZARAGOZA, G., ALARCÓN-PADILLA, D.C. and BLANCO, J., 2013. Evaluation of Cooling Technologies of Concentrated Solar Power Plants and their Combination with Desalination in the Mediterranean Area. *Applied Thermal Engineering*, vol. 50, no. 2, pp. 1514-1521.
- [26] PANKRATZ, T., 2014. *IDA Desalination Yearbook 2014-2015*. Topsfield, MA.
- [27] REYES VIGH, C.F., 2012. Influencia Del Almacenamiento Térmico En El Desempeño De Una Planta Termosolar Para La Generación De Electricidad.
- [28] RICHTER, C., TESKE, S. and SHORT, R., 2009. *Energía Solar Térmica De Concentración*.
- [29] SANCHO, J., et al, 2012. Atlas De Radiación Solar En España Utilizando Datos Del SAF De Clima De EUMETSAT. *Agencia Estatal De Meteorología (AEMET), Ministerio De Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente Del Gobierno De España*.
- [30] TAWNEY, R., KHAN, Z. and ZACHARY, J., 2005. Economic and Performance Evaluation of Heat Sink Options in Combined Cycle Applications. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 127, no. 2, pp. 397-403.
- [31] TESKE, S. and LEUNG, J., 2016. *Solar Thermal Electricity. Global Outlook 2016*. E. ROCHON ed., Greenpeace International ed.
- [32] TESKE, S., ZERVOS, A. and SCHÄFER, O., 2007. *[r]Evolución Energética. Perspectiva Mundial De La Energía Renovable*. C. AUBREY ed.
- [33] TURCHI, G. and KUTSCHER, C., 2009. *Water use in Concentrating Solar Power (CSP)*. Tucson.
- [34] US Department of Energy., 2009. *Concentrating Solar Power Commercial Application Study: Reducing Water Consumption of Concentrating Solar Power Electricity Generation*. Washington, DC.
- [35] VALERO, A., UCHE, J. and SERRA, L., 2001. La Desalación Como Alternativa Al PHN. *Informe Técnico, CIRCE y Centro Politécnico Superior De La Universidad De Zaragoza*.

## BIBLIOGRAFÍA

---

- [36] WEBBER, M.E., 2008. Catch-22: Water Vs. Energy. *Scientific American*, vol. 18, pp. 34-41.

## ANEXO I

[illegible]



## ANEXOS

```
% Temperatura del vapor en el último efecto (°C)
T(N_efectos)=40;

%Coeficiente Global de Transferencia de Calor en primer efecto
(kW/m2·°C)
U(1)=2.4;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% CALCULO DE LOS CALORES LATENTES MOTIVE STEAM y VAPOR EN ULTIMO EFECTO (kJ/kg)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

Ls=2501.897149-2.407064037*Ts+1.192217*10^-3*Ts^2-1.5863*10^-5*Ts^3;

Lv(N_efectos)=2501.897149-2.407064037*(T(N_efectos)-T_loss)+1.192217*10^-3*(T(N_efectos)-T_loss)^2-1.5863*10^-5*(T(N_efectos)-T_loss)^3;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% COMIENZO DEL CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Flujo de salmuera que sale del último efecto y flujo de agua de alimentación precalentado

Bn= Md*(Xf/(Xn-Xf));
Mf=Md+Bn;

% Calculo de coeficientes de transferencia de calor U1-Un
% Imponemos Ui+1=0.95Ui

for i=2:N_efectos
    U(i)=0.95*(U(i-1));
end

% Perdidas de carga totales (entre motive steam y ultimo efecto)

CaídaT_Total=Ts-T(N_efectos);

%Calculo suma de las inversas

Sum_U=sum(1./U);

% Vector Caídas de temperatura en cada efecto (incr_T) (°C)

% Efecto 1

incr_T(1)=CaídaT_Total/(U(1)*Sum_U);

% Efectos 2 a n

for i=2:N_efectos
    incr_T(i)=incr_T(1)*(U(1)/U(i));
end
```

ANEXOS

---

```
% COMIENZO DE LA ITERACIÓN
tolerancia=10^-4;

while (max_Dif>tolerancia)

iter=iter+1;

% Calculo de las temperaturas de los vapores en cada efecto

% Primer efecto
T(1)=Ts-incr_T(1);
% Efectos 2 a n

for i=2:(N_efectos-1)
    T(i)=T(i-1)-(incr_T(1)*U(1)/U(i));
end

% CALORES LATENTES DE LOS VAPORES FORMADOS EN CADA EFECTO

for i=1:N_efectos

    Lv(i)=2501.897149-2.407064037*(T(i)-T_loss)+1.192217*10^-3*(T(i)-
T_loss)^2-1.5863*10^-5*(T(i)-T_loss)^3;
end

% CALCULO FLUJOS DE DESTILADO EN TODOS LOS EFECTOS

% MATRIZ AUXILIAR (aux) FORMADA POR COCIENTES DE CALORES LATENTES

% Efecto 1

for i=1:(N_efectos-1)
    aux(i)=Lv(1)/Lv(i+1);
end

D(1)=Md/(1+sum(aux));

% Efecto 2 a n

for i=2:N_efectos
    D(i)=D(1)*(Lv(1)/Lv(i));
end

% CALCULO FLUJOS DE SALMUERA EN TODOS LOS EFECTOS

% Efecto 1

B(1)=Mf-D(1);

% Efecto 2 a n

for i=2:N_efectos
    B(i)=B(i-1)-D(i);
end
```

## ANEXOS

```
% CONCENTRACIÓN DE SALES EN TODOS LOS EFECTOS

% Efecto 1

X(1)=(Xf*Mf)/B(1);

for i=2:N_efectos
    X(i)=(X(i-1)*B(i-1))/B(i);
end

% CALCULO DE AREAS DE INTERCAMBIO

% Efecto 1

A(1)=(D(1)*Lv(1))/(U(1)*(Ts-T(1)));

% Efectos 2 a n

for i=2:N_efectos
    A(i)=(D(i)*Lv(i))/(U(i)*(incr_T(i)-T_loss));
end

% Maxima diferencia de areas
for i=1:(N_efectos)
    for j=1:N_efectos
        Dif_A(i,j)=(A(i)-A(j));
    end
end

max_Dif=max(max(abs(Dif_A)));

% Se realiza la media de areas
med_Area=sum(A)/N_efectos;

% NUEVAS CAIDAS DE TEMPERATURA EN CADA EFECTO

for i=1:N_efectos

    incr_Tnuevo(i)=(incr_T(i)*A(i))/med_Area;

    incr_T=incr_Tnuevo;

end

%% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %% %%

% PARAMETROS DE ACTUACION

% GASTO MASICO EXTRACCION TURBINA Y PERFORMANCE RATIO

Ms=(D(1)*Lv(1))/Ls;

PR=Md/Ms;
```

## ANEXOS

```
% CALCULOS DEL CONDENSADOR FINAL

% Flujo de Calor tiempo (kJ/s) CALOR EVACUADO
Qcond=D(N_efectos)*Lv(N_efectos);

LMTDcond=(T_aguamar-Tin_efecto)/log((T(N_efectos)-T_loss-
Tin_efecto)/(T(N_efectos)-T_loss-T_aguamar));

Ucond=U(N_efectos)*0.95;

Acond= Qcond/(LMTDcond*Ucond);

% AREA DE TRANSFERENCIA DE CALOR ESPECIFICA

sA=(Acond+sum(A))/Md;

% FLUJO MASICO DE AGUA DE REFRIGERACIÓN "COOLING SEAWATER"

Mcw=-Mf+((D(N_efectos)*Lv(N_efectos))/(Cp*(Tin_efecto-T_aguamar)));

% Flujo masico especifico de cooling seawater
Mcws=Md/Mcw;

% RESULTADOS

fprintf('Performance Ratio PR es %.2f \n',PR);
fprintf('El calor evacuado en la planta MED es es %.3f MW
\n',Qcond/1000);
fprintf('El área específica es %.2f m2 \n',sA);
fprintf('El flujo de agua de mar de refrigeracion "Cooling water" es
%.2f kg/s \n',Mcw);
fprintf('El flujo de vapor de calentamiento externo "motive steam" es
%.2f kg/s \n',Ms);

fprintf('\n');
fprintf('Efecto 1\n U=%.3f (kW/m2·°C) B=%.3f kg/s D=%.3f kg/s X=%.3f
ppm T=%.3f °C A=%.3f m2',U(1),B(1),D(1),X(1),T(1),A(1));

fprintf('\n');
fprintf('Efecto 2\n U=%.3f (kW/m2·°C) B=%.3f kg/s D=%.3f kg/s X=%.3f
ppm T=%.3f °C A=%.3f m2',U(2),B(2),D(2),X(2),T(2),A(2));

fprintf('\n');
fprintf('Efecto 3\n U=%.3f (kW/m2·°C) B=%.3f kg/s D=%.3f kg/s X=%.3f
ppm T=%.3f °C A=%.3f m2',U(3),B(3),D(3),X(3),T(3),A(3));

fprintf('\n');
fprintf('Efecto 4\n U=%.3f (kW/m2·°C) B=%.3f kg/s D=%.3f kg/s X=%.3f
ppm T=%.3f °C A=%.3f m2',U(4),B(4),D(4),X(4),T(4),A(4));

fprintf('\n');
fprintf('Efecto 5\n U=%.3f (kW/m2·°C) B=%.3f kg/s D=%.3f kg/s X=%.3f
ppm T=%.3f °C A=%.3f m2',U(5),B(5),D(5),X(5),T(5),A(5));

fprintf('\n');
fprintf('Efecto 6\n U=%.3f (kW/m2·°C) B=%.3f kg/s D=%.3f kg/s X=%.3f
ppm T=%.3f °C A=%.3f m2',U(6),B(6),D(6),X(6),T(6),A(6));
```

ANEXOS

---

```
fprintf('\n');  
fprintf('Efecto 7\n U=%.3f (kW/m2·°C) B=%.3f kg/s D=%.3f kg/s X=%.3f  
ppm T=%.3f °C A=%.3f m2',U(7),B(7),D(7),X(7),T(7),A(7));
```

```
fprintf('\n');  
fprintf('Condensador final\n U=%.3f (kW/m2·°C) T=%.3f °C A=%.3f  
m2',Ucond, T(N_efectos),Acond);
```


## ANEXO II

Acerca de la legislatura sobre el dominio público marítimo terrestre

**Fuente:** MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. GOBIERNO DE ESPAÑA.

*Sostenibilidad: Dominio Público Marítimo Terrestre.* Fecha: 3 de Septiembre de 2016

Disponible en: [http://sig.magrama.es/Docs/PDFServiciosProd2/DPMT\\_Costa.pdf](http://sig.magrama.es/Docs/PDFServiciosProd2/DPMT_Costa.pdf)



### SOSTENIBILIDAD: DOMINIO PÚBLICO MARÍTIMO TERRESTRE

INTRODUCCIÓN  
 DOMINIO PÚBLICO MARÍTIMO TERRESTRE  
 LIMITACIONES SOBRE LOS TERRENOS COLINDANTES CON LA RIBERA DEL MAR  
 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA ASOCIADA AL SERVICIO  
 INFORMACIÓN ALFANUMÉRICA ASOCIADA AL SERVICIO  
 CONSULTA A TRAVÉS DE SERVICIOS WMS Y METADATOS

#### INTRODUCCIÓN

España disfruta de una gran longitud de costa (más de 10.000 km de bienes de dominio público marítimo-terrestre), de gran valor medioambiental (por la variedad de ecosistemas que alberga: playas, dunas, flechas litorales, marismas, acantilados...), muy deseada como soporte de actividades (el 44% de la población española vive en los municipios costeros que apenas representan el 7% del territorio), de gran importancia económica (el 80% de los casi 60 millones de turistas que nos visitan al año eligen la costa para sus vacaciones), pero muy frágil en su equilibrio físico, con importantes problemas de erosión que se verán agravados con el cambio climático.

La nueva normativa en materia de costas contempla los mecanismos adecuados para mitigar los problemas a los que actualmente se enfrenta nuestra costa.

La Ley de Costas es la norma que define y regula el dominio público marítimo-terrestre (DPMT).


La normativa básica de aplicación es la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas, la Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de Costas y el Real Decreto 876/2014, de 10 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento General de Costas.

Desde la fecha de entrada en vigor de la Ley 22/1988, de 28 de julio, se han introducido numerosas modificaciones en la misma en aras a una mayor protección de la costa española y una mayor seguridad jurídica de los sujetos afectados por las limitaciones impuestas por esta normativa. La **Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de Costas**, modificó recientemente la citada Ley de Costas, estableciendo un nuevo marco legislativo, que tiene como objetivo el incremento de la seguridad jurídica para las actuaciones que afecten al litoral y la promoción de una efectiva protección del mismo que resulte compatible con el impulso de la actividad económica y la generación de empleo. Ello sin olvidar la regulación de los procedimientos administrativos relativos a la determinación del dominio público marítimo terrestre y su régimen de utilización, así como los relacionados con las limitaciones de la propiedad de los terrenos contiguos a la ribera del mar para garantizar la integridad y el uso público del DPMT y el desarrollo del régimen transitorio.

#### DOMINIO PÚBLICO MARÍTIMO TERRESTRE

El dominio público marítimo-terrestre lo constituyen la zona marítimo-terrestre, las playas, las aguas interiores, el mar territorial y los recursos naturales de la zona económica y la plataforma continental, según establece la Constitución de 1978 y siendo la normativa de Costas la que precisa y define estos conceptos.

*Sostenibilidad: Dominio Público Marítimo Terrestre*
Página 1 de 5


Costas



## SOSTENIBILIDAD: DOMINIO PÚBLICO MARÍTIMO TERRESTRE

### INTRODUCCIÓN

#### DOMINIO PÚBLICO MARÍTIMO TERRESTRE

#### LIMITACIONES SOBRE LOS TERRENOS COLINDANTES CON LA RIBERA DEL MAR

#### INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA ASOCIADA AL SERVICIO

#### INFORMACIÓN ALFANUMÉRICA ASOCIADA AL SERVICIO

#### CONSULTA A TRAVÉS DE SERVICIOS WMS Y METADATOS

### INTRODUCCIÓN

---

España disfruta de una gran longitud de costa (más de 10.000 km de bienes de dominio público marítimo-terrestre ), de gran valor medioambiental (por la variedad de ecosistemas que alberga: playas, dunas, flechas litorales, marismas, acantilados...), muy deseada como soporte de actividades (el 44% de la población española vive en los municipios costeros que apenas representan el 7% del territorio), de gran importancia económica (el 80% de los casi 60 millones de turistas que nos visitan al año eligen la costa para sus vacaciones), pero muy frágil en su equilibrio físico, con importantes problemas de erosión que se verán agravados con el cambio climático.

La nueva normativa en materia de costas contempla los mecanismos adecuados para mitigar los problemas a los que actualmente se enfrenta nuestra costa.

La Ley de Costas es la norma que define y regula el dominio público marítimo-terrestre (DPMT).

La normativa básica de aplicación es la Ley 22/1988, de 28 de julio, de Costas, la Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de Costas y el Real Decreto 876/2014, de 10 de octubre, por el que se aprueba el Reglamento General de Costas.

Desde la fecha de entrada en vigor de la Ley 22/1988, de 28 de julio, se han introducido numerosas modificaciones en la misma en aras a una mayor protección de la costa española y una mayor seguridad jurídica de los sujetos afectados por las limitaciones impuestas por esta normativa. La **Ley 2/2013, de 29 de mayo, de protección y uso sostenible del litoral y de modificación de la Ley 22/1988, de Costas**, modificó recientemente la citada Ley de Costas, estableciendo un nuevo marco legislativo, que tiene como objetivo el incremento de la seguridad jurídica para las actuaciones que afecten al litoral y la promoción de una efectiva protección del mismo que resulte compatible con el impulso de la actividad económica y la generación de empleo. Ello sin olvidar la regulación de los procedimientos administrativos relativos a la determinación del dominio público marítimo terrestre y su régimen de utilización, así como los relacionados con las limitaciones de la propiedad de los terrenos contiguos a la ribera del mar para garantizar la integridad y el uso público del DPMT y el desarrollo del régimen transitorio.

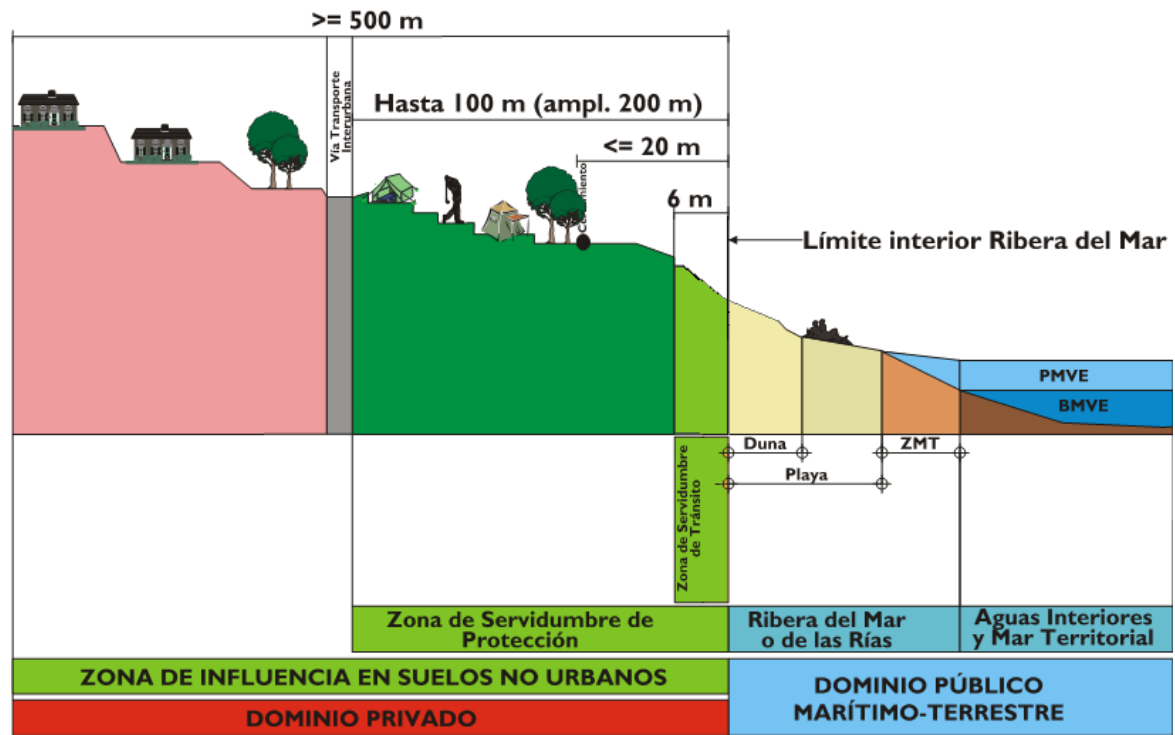
### DOMINIO PÚBLICO MARÍTIMO TERRESTRE

---

El dominio público marítimo-terrestre lo constituyen la zona marítimo-terrestre, las playas, las aguas interiores, el mar territorial y los recursos naturales de la zona económica y la plataforma continental, según establece la Constitución de 1978 y siendo la normativa de Costas la que precisa y define estos conceptos.

Es fácil entender que bienes tan valiosos y anhelados por todos como las playas, los sistemas dunares, los acantilados, las marismas, los humedales litorales, etc, sean de DPMT, tanto para garantizar su protección, como el disfrute público.

Los bienes que constituyen el dominio público marítimo-terrestre, vienen regulados en los artículos 3, 4 y 5 de la Ley de Costas y en los artículos 3, 4, 5, 6, 7 y 8 del Reglamento General de Costas



Mediante el procedimiento administrativo del deslinde. Este procedimiento consiste en identificar qué terrenos reúnen las características, físicas o jurídicas, descritas en la Ley de Costas, para establecer cuál es el límite que los hace calificarlos como DPMT.

Por esa razón, la realización de los deslindes proporciona la debida seguridad jurídica a todos los ciudadanos para determinar el límite entre el DPMT y la propiedad privada.

El procedimiento de deslinde viene regulado en los artículos 11 y siguientes de la Ley de Costas y artículos 17 y siguientes del Reglamento General de Costas.

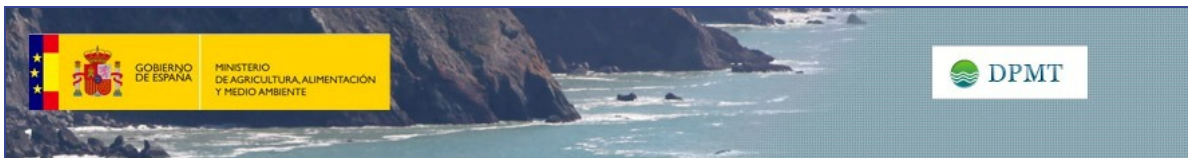
## LIMITACIONES SOBRE LOS TERRENOS COLINDANTES CON LA RIBERA DEL MAR

Para proteger la estrecha franja que constituye el dominio público marítimo-terrestre, la normativa de costas establece una serie de limitaciones sobre los terrenos colindantes:

La llamada **servidumbre de tránsito** que recae sobre una franja de 6 metros sobre los terrenos de propiedad privada colindantes con el dominio público, cuya finalidad es la de permitir el tránsito por el litoral.

La denominada **servidumbre de protección**, que afecta a los terrenos de propiedad privada colindantes con el dominio público **en la que se mantiene la titularidad privada de las parcelas y sus edificaciones**, aunque se sujeta a estas propiedades a unas limitaciones, por razón de su colindancia con la ribera del mar. Estas limitaciones suponen la imposibilidad de ejecutar nuevas obras o construcciones contrarias a la Ley





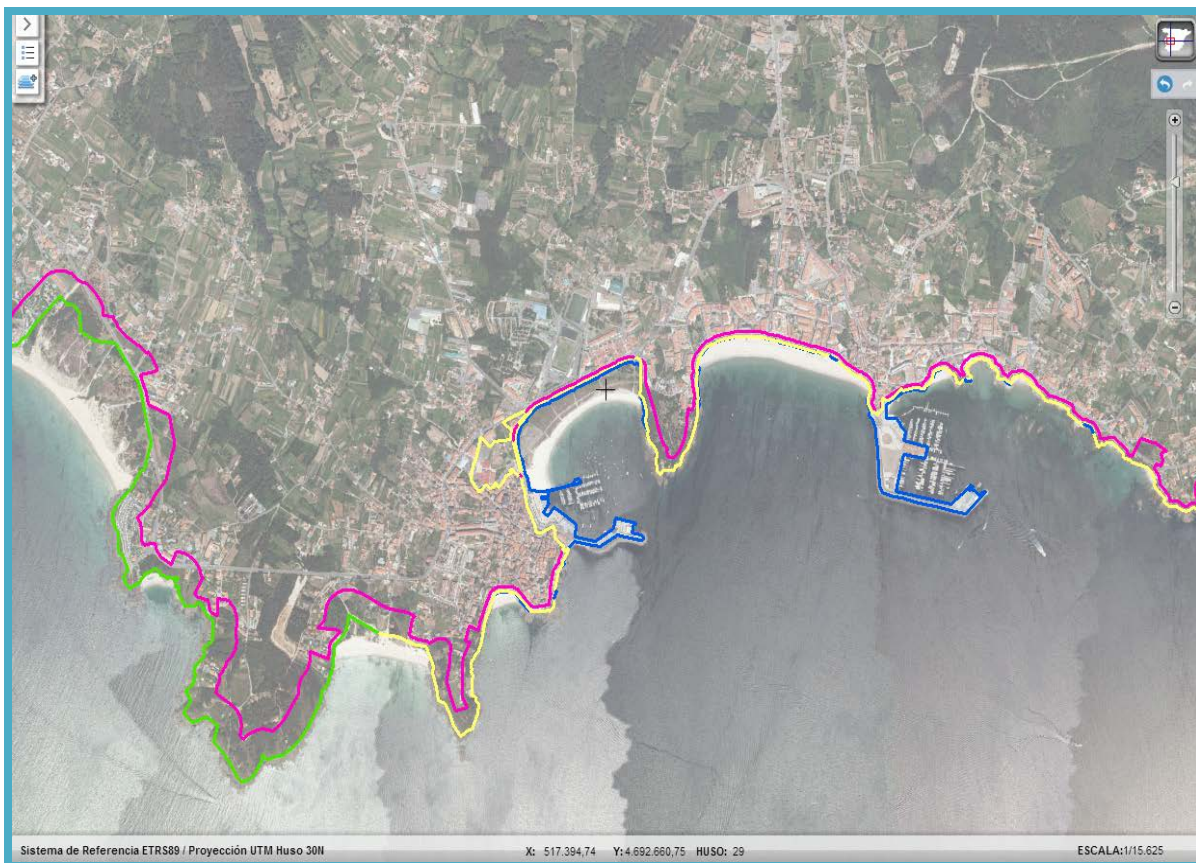
en la que se prohíben nuevos usos residenciales o habitacionales. Esta servidumbre tiene una anchura de 20 metros en terrenos que tenían la consideración de suelo urbano antes de la Ley de Costas y de 100 metros en terrenos que no habían sido urbanizados y no tenían derechos urbanísticos adquiridos.

La **servidumbre de acceso al mar** que viene determinada en los instrumentos de planeamiento urbanístico.

La llamada **zona de influencia** que recae sobre una franja de 500 metros y que contiene pautas dirigidas al planificador con el objeto de evitar la formación de pantallas arquitectónicas en el borde de la costa.

## INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA ASOCIADA AL SERVICIO

La cartografía incluida en este servicio contiene las zonas definidas como **Deslinde DPMT** y su correspondiente información alfanumérica asociada. Así como las zonas de **exclusión de determinados núcleos de población y terrenos del dominio público marítimo-terrestre**.



**Imagen de detalle de la información del servicio**

## INFORMACIÓN ALFANUMÉRICA ASOCIADA AL SERVICIO

Los datos que se pueden consultar en la FICHA de cada capa SIG de la **Gestión del DPMT** son:

- **Línea de deslinde del Dominio Público Marítimo-Terrestre**
  - Provincia
  - Referencia
  - Término municipal
  - Orden Ministerial
  - DPMT
- **Núcleos excluidos (DA 7ª Ley de Costas) del DPMT**
  - Provincia
  - Referencia
  - Término municipal
- **Terrenos innecesarios del DPMT**
  - Provincia
  - Referencia
  - Término municipal
  - Tipo de línea

## DESCARGA

En este enlace se puede descargar las capas SIG correspondiente a la [Gestión del Dominio Público Marítimo Terrestre](#).

## CONSULTA A TRAVÉS DE SERVICIOS WMS Y METADATOS

- **Servidor WMS:** Para visualizar la información espacial es necesario disponer de un Sistema de Información Geográfica.
  - **Línea de deslinde del Dominio Público Marítimo-Terrestre**
    - **URL de acceso al servicio:**  
<http://wms.magrama.es/sig/Costas/DPMT/wms.aspx>
    - **Descripción del servicio:**  
Características del Servicio (Capabilities versión 1.3.0)  
<http://wms.magrama.es/sig/costas/DPMT/wms.aspx?request=getcapabilities>
  - **Núcleos excluidos (DA 7ª Ley de Costas) del DPMT**
    - **URL de acceso al servicio:**  
<http://wms.magrama.es/sig/Costas/NucleosExcluidos/wms.aspx>
    - **Descripción del servicio:**  
Características del Servicio (Capabilities versión 1.3.0)  
<http://wms.magrama.es/sig/costas/NucleosExcluidos/wms.aspx?request=getcapabilities>



- **Terrenos innecesarios del DPMT**
  - **URL de acceso al servicio:**  
<http://wms.magrama.es/sig/Costas/TerrenosInnecesarios/wms.aspx>
  - **Descripción del servicio:**  
Características del Servicio (Capabilities versión 1.3.0)  
<http://wms.magrama.es/sig/costas/TerrenosInnecesarios/wms.aspx?request=getcapabilities>
- **Metadatos:**
  - **Línea de deslinde del Dominio Público Marítimo-Terrestre**
    - **URL de acceso al servicio**  
<http://www.magrama.gob.es/ide/metadatos/index.html?srv=metadata.show&uuid=6bd4a451-4cc0-4ebb-9687-2119027fd12e>
  - **Núcleos excluidos (DA 7ª Ley de Costas) del DPMT**
    - **URL de acceso al servicio**  
<http://www.magrama.gob.es/ide/metadatos/index.html?srv=metadata.show&uuid=664dc89c-3742-4372-bd81-a45348aba916>
  - **Terrenos innecesarios del DPMT**
    - **URL de acceso al servicio**  
<http://www.magrama.gob.es/ide/metadatos/index.html?srv=metadata.show&uuid=4cb67d89-3da4-4da6-a0e7-3afca7baf5ee>

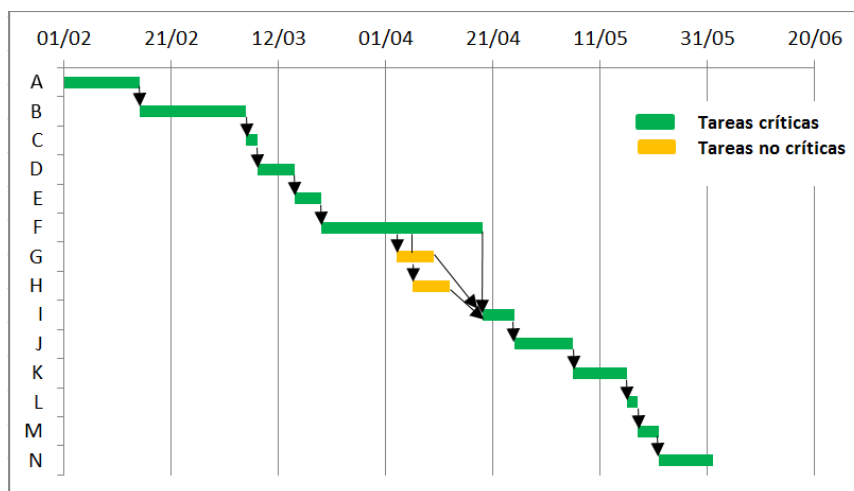
## ANEXO III

Acerca de la planificación, secuenciación y temporización de las tareas que componen el proyecto (1/02/2016- 1/06/2016) y del coste económico del proyecto.

### A. Organización del proyecto:

Tabla III.1. Descripción de las tareas

Actividad	Definición	Descripción
A	Búsqueda del tema a desarrollar	Consulta a libros, páginas web y tutor en busca de un tema de interés común a profesor y alumno
B	Investigación	Lectura de libros, páginas web, reportajes, artículos de revistas académicas, leyes y estatutos, tesis, monografías y videos para estructurar el cuerpo del trabajo
C	Definición de objetivos, alcance y motivación del trabajo	Establecimiento de los objetivos y limitaciones del proyecto, en base a las herramientas y tiempo disponibles. Justificación del trabajo
D	Redacción del contexto social, económico y ambiental	Redacción personal de la primera parte del trabajo, correspondiente a situación actual del problema planteado (Agua y Energía)
E	Selección de las tecnologías a utilizar	En base a todas las alternativas posibles, selección y justificación por escrito de las tecnologías y sus componentes más adecuados para alcanzar el objetivo propuesto
F	Redacción de sistemas presentes en el proyecto	Escrito personal de la anatomía y funcionamiento de los sistemas seleccionados, por separado (Planta de colectores cilindro parabólicos y planta MED)
G	Modelizado de la planta MED	Escrito del código de programación en Matlab perteneciente al modelizado de la planta desalinizadora de múltiple efecto
H	Modelizado del ciclo de producción de vapor	Diseño e implementación del ciclo de producción de vapor en software CyclePad
I	Estudio del sistema completo	Unión de modelizados y definición del comportamiento estacionario del sistema conjunto, atendiendo a las limitaciones de cada uno
J	Redacción y análisis técnico de resultados	Obtención, escrito y estudio de los parámetros técnicos obtenidos de los modelizados
K	Estudio y análisis económico	Estudio de los parámetros económicos que afectan al proyecto. Cálculo práctico de costes de capital y rentabilidad de escenarios económicos planteados
L	Conclusiones y futuro del proyecto	Obtención de las conclusiones obtenidas en base a los resultados
M	Bibliografía	Escrito de referencias bibliográficas utilizadas y su participación en el texto
N	Finalización del proyecto	Revisión de cómputo global del trabajo: corrección de errores, creación de portada, índice y anexos, definición del formato de trabajo.



**Figura III.1.** Diagrama de Gantt del proyecto.

## B. Presupuesto del proyecto:

**Tabla III.2.** Costes de realización del proyecto

Costes del proyecto				
Tipo de coste	Descripción	Horas	Coste por hora (€/hora)	Coste total (€)
Costes materiales y licencias de usuario	Coste de ordenador portátil			48,25
	Coste licencia Matlab R2011a			35
	Coste licencia Microsoft Office			149
	Coste bibliografía			500
Costes de trabajo y aprendizaje	Investigación y estudio del tema del proyecto	102	15	1530
	Redacción de la memoria (incluida bibliografía)	198	20	3960
	Programación en Matlab	21	25	525
	Simulación CyclePad	21	25	525
	Análisis de resultados	33	25	825
	Finalización del proyecto (portada, índice, anexos, formato)	30	15	450
	Costes de aprendizaje de software	6	17	102
	Costes de aprendizaje de parte técnica del proyecto	9	17	153
	Costes de aprendizaje de parte económica del proyecto	9	17	153
Coste total				8955,25

- Se ha establecido una media de 3 horas de trabajo por cada día
- El coste unitario se encuentra entre 15 y 25 euros por hora, en base a la magnitud de esfuerzo de la tarea
- El coste del ordenador portátil se ha obtenido como el coste fijo del portátil por la relación entre el tiempo de empleo de este durante el trabajo y la vida útil del mismo